

Modificirani MAG postupci za visokoučinsko zavarivanje

Mikulić, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:491003>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-26**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matija Mikulić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Matija Mikulić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom strpljenju i povjerenju tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech., na velikoj pomoći i strpljenju tijekom izrade diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem obitelji i djevojci na podršci i strpljenju tijekom izrade diplomskog rada i tijekom cijelog studija.

Matija Mikulić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MATIJA MIKULIĆ** Mat. br.: 1191217464

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modificirani MAG postupci za visokoučinsko zavarivanje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modified MAG processes for high production welding**

Opis zadatka:

Nabrojiti i opisati modifikacije MAG postupka koje se klasificiraju kao visokoučinske. Usporediti sa konvencionalnim MAG postupcima sa stanovišta količine nataljenog metala, unosa topline, pripreme spoja te potrebne opreme. Komentirati primjenjive osnovne materijale na temelju primjera iz literature te pojasniti postignuta mehanička svojstva spoja i eventualne probleme.

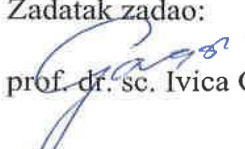
U eksperimentalnom dijelu za zadanu debljinu materijala 20 mm kvalitete S355 definirati tehnologiju zavarivanja konvencionalnim MAG postupkom štrcajućim lukom i modificiranim MAG postupkom koji primjenjuje zakopani luk. Na zavarenim uzorcima provesti nerazorna i razorna ispitivanja te usporediti postignute rezultate. Provesti detaljnu ekonomsku analizu i donijeti zaključke o prikladnosti modificiranog MAG postupka uz primjenu zakopanog luka.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
08. ožujka 2018.

Rok predaje rada:
10. svibnja 2018.

Predviđeni datum obrane:
16. svibnja 2018.
17. svibnja 2018.
18. svibnja 2018.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA	VI
POPIS KRATICA	VII
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
2. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE TALJIVOM ELEKTRODOM U ZAŠTITNOJ ATMOSFERI AKTIVNOG PLINA (MAG ZAVARIVANJE)	2
2.1. Povijest i razvoj MAG postupka zavarivanja	3
2.2. Osnovni parametri MAG zavarivanja	4
2.3. Načini prijenosa metala u električnom luku	7
2.4. Oprema za MAG zavarivanje	11
2.4.1. Izvori struje za MAG zavarivanje	11
2.4.2. Sustav za dovod dodatnog materijala	13
2.4.3. Polikabel i pištolj za zavarivanje	17
2.4.4. Sustav za dovod zaštitnog plina	18
2.4.5. Upravljački sustav uređaja za MAG zavarivanje	18
3. MODIFICIRANI POSTUPCI MAG ZAVARIVANJA	19
3.1. Modificirani prijenos metala kratkim spojevima	19
3.1.1. Surface Tension Transfer®	19
3.1.2. Cold Metal Transfer®	23

3.1.3. FastROOT®	24
3.1.4. Controlled bridge transfer®	26
3.2. Modificirani prijenos metala štrcajućim lukom.....	26
3.2.1. Rapid MAG Technology®	27
3.2.2. ForceArc®	27
3.2.3. PowerMode®	29
3.3. Visokoučinski postupci MAG zavarivanja	29
3.3.1. Flux Cored Arc Welding.....	30
3.3.2. Tandem Welding.....	31
3.3.3. Rotirajući luk	35
3.3.4. Zakopani luk – „D-Arc“	36
4. EKSPERIMENTALNI RAD	40
4.1. Osnovni materijal.....	40
4.2. Zavarivanje konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja – uzorak „A“	41
4.2.1. Oblikovanje zavarenog spoja.....	41
4.2.2. Dodatni materijal	42
4.2.3. Zaštitni plin	42
4.2.4. Pojedini postupka zavarivanja.....	42
4.2.5. Rezultati mjerenja tvrdoće	44
4.2.6. Rezultati mjerenja udarnog rada loma	45
4.3. Zavarivanje modificiranim MAG postupkom koji primjenjuje zakopani luk – uzorak „B“ ..	46
4.3.1. Oblikovanje zavarenog spoja.....	47
4.3.2. Dodatni materijal	48
4.3.3. Zaštitni plin	48
4.3.4. Pojedini postupka zavarivanja.....	48

4.3.5. Analiza mikrostrukture	49
4.3.6. Rezultati mjerenja tvrdoće	52
4.3.7. Rezultati mjerenja udarnog rada loma	53
4.4. Utjecaj pripreme spoja na kvalitetu zavara kod „D-Arc“ sustava	54
4.5. Ekonomska analiza	56
4.5.1. Priprema spoja	56
4.5.2. Dodatni materijal i zaštitni plin.....	57
4.5.3. Vrijeme zavarivanja	58
4.5.4. Deformacije.....	59
4.5.5. Grafički prikaz rezultata analize	59
5. ZAKLJUČAK	61
6. LITERATURA	62
7. PRILOG	65

POPIS SLIKA

Slika 1.	Oprema za MAG zavarivanja [1].....	2
Slika 2.	Ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini zavarivanja [2]	5
Slika 3.	Slobodni kraj žice [2].....	6
Slika 4.	Prijenos metala kratkim spojevima [6]	7
Slika 5.	Prijenos metala prijelaznim lukom [2].....	8
Slika 6.	Prijenos metala štrcajućim lukom [2]	9
Slika 7.	Prijenos metala impulsnim lukom - promjena struje zavarivanja ovisno o vremenu [7] ..	10
Slika 8.	Blagopadajuća karakteristika izvora struje za zavarivanje [4]	13
Slika 9.	Najvažniji dijelovi dodavača žice [8]	14
Slika 10.	Sustav za dodavanje žice „push“ [9]	15
Slika 11.	Sustav za dodavanje žice „push-pull“ [9].....	16
Slika 12.	„Spool gun“ pištolj [9].....	16
Slika 13.	Usporedni prikaz tipova kotačića za izravnavanje žice [8]	17
Slika 14.	Prikaz presjeka pištolja za MAG zavarivanje [2].....	17
Slika 15.	Utjecaj vršne struje na geometriju zavora [14].....	20
Slika 16.	Utjecaj osnovne struje na geometriju zavora [14]	20
Slika 17.	Prikaz dinamičkih karakteristika STT postupka [11]	21
Slika 18.	Izbrusak korijenskog prolaza zavarenog STT postupkom [11].....	23
Slika 19.	Faze CMT postupka zavarivanja [13]	23
Slika 20.	Dinamička karakteristika FastROOT postupka: $1-u=f(t)$; $2-i=f(t)$ [8]	25
Slika 21.	Zav. spoj dupleks i superaustenitnog čelika debljine 2 mm uz razmak 2 do 3 mm [8]..	25
Slika 22.	Princip rada CBT postupka zavarivanja [18]	26
Slika 23.	Priprema kutnog spoja kod RMT postupka zavarivanja [12].....	27
Slika 24.	Faze EWM forceArc postupka zavarivanja [10]	28
Slika 25.	Prikaz karakteristike PowerMode postupka zavarivanja [22]	29
Slika 26.	Presjeci praškom punjenih žica [4].....	30
Slika 27.	Zaštitna atmosfera kod FCAW postupka zavarivanja [24]	30
Slika 28.	Sustav za tandem postupak zavarivanja [25].....	32

Slika 29.	Graf jakosti struje za pojedine elektrode kod tandem postupka [25]	32
Slika 30.	Pištolj za tandem postupak zavarivanja [13]	33
Slika 31.	Zavareni spoj čelika S690Q debljine 6 mm - tandem postupak zavarivanja [13]	34
Slika 32.	Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim i rotirajućim lukom [10]	35
Slika 33.	Usporedba izgleda profila zavara kod štrcajućeg i rotirajućeg luka [10]	36
Slika 34.	Shematski prikaz konvencionalnog MAG postupka i zakopanog luka [28]	37
Slika 35.	Prikaz zakopanog luka [28]	37
Slika 36.	Usporedba presjeka zavara zavarenih konvencionalnom i „D-Arc“ tehnologijom [28] ..	38
Slika 37.	Priprema spoja – uzorak „A“ [30]	41
Slika 38.	Redoslijed zavarivanja [30]	42
Slika 39.	Izgled lica zavara – uzorak „A“ [30]	43
Slika 40.	Makroizbrusak uzorka „A“ [30]	44
Slika 41.	Mjerenje tvrdoće uzorka „A“ [30]	44
Slika 42.	Položaj epruvete i zareza za ispitivanje udarnog rada loma - uzorak „A“ [30]	45
Slika 43.	Robot za zavarivanje OTC FD-V20S [29]	46
Slika 44.	Izvori struje za zavarivanje M500D [29]	47
Slika 45.	Priprema drugog zavarenog spoja [29]	47
Slika 46.	Fotografija uzorka „B“ neposredno nakon zavarivanja [29]	49
Slika 47.	Makroizbrusak uzorka „B“ [29]	49
Slika 48.	Mikrostruktura osnovnog materijala [29]	50
Slika 49.	Mikrostruktura ZUT-1 [29]	50
Slika 50.	Mikrostruktura ZUT-2 [29]	51
Slika 51.	Mikrostruktura ZUT-3 [29]	51
Slika 52.	Mikrostruktura na granici zavara [29]	52
Slika 53.	Mikrostruktura metala zavara [29]	52
Slika 54.	Mjerenje tvrdoće uzorka „B“ [29]	53
Slika 55.	Radiogram zavara – uzorak „C“	56
Slika 56.	Deformacije radnih komada [28]	59
Slika 57.	Grafikon rezultata ekonomske analize uzoraka zavarenih konvencionalnim MAG postupkom i upotrebom „D-Arc“ sustava	60

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Parametri korišteni tijekom zavarivanja čelika S690Q [13]	34
Tablica 2.	Kemijski sastav čelika S355 J2+N izražen u postocima [29]	41
Tablica 3.	Mehanička svojstva čelika S355 J2+N [29].....	41
Tablica 4.	Parametri zavarivanja uzorka „A“ [30].....	43
Tablica 5.	Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka „A“ [30]	45
Tablica 6.	Rezultati ispitivanja udarnog rada loma – uzorak „A“ [30]	46
Tablica 7.	Parametri zavarivanja [29].....	48
Tablica 8.	Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka „B“ [29]	53
Tablica 9.	Rezultati mjerenja udarnog rada loma - uzorak „B“ [29]	53
Tablica 10.	Parametri zavarivanja uzorka „C“	54
Tablica 11.	Parametri snimanja uzorka „C“	55
Tablica 12.	Parametri skeniranja uzorka „C“	55
Tablica 13.	Izračun površine presjeka žlijeba.....	57

POPIS KRATICA

Kratika	Opis kratice
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (eng. Metal active gas)
CO ₂	Ugljični dioksid
O ₂	Kisik
Ar	Argon
DC	Istosmjerna struja (eng. Direct current)
AC	Izmjenična struja (eng. Alternating current)
IGBT	Bipolarni tranzistor s izoliranom upravljačkom elektrodom
STT	Prijenos metala površinskom napetošću (eng. Surface tension transfer)
CMT	Prijenos metala kratkim spojevima uz vrlo mali unos topline (eng. Cold metal transfer)
FastROOT	Modificirani MAG postupak temeljen na prijenosu metala kratkim spojevima
CBT	Modificirani MAG postupak koji kombinira prednosti impulsnog i klasičnog MAG zavarivanja (eng. Controlled bridge transfer)
RMT	Modificirani MAG postupak temeljen na prijenosu metala štrcajućim lukom (eng. Rapid MAG technology)
ForceArc	Modificirani MAG postupak temeljen na prijenosu metala štrcajućim lukom
PowerMode	Modificirani MAG postupak koji omogućava stabilan električni luk s jednolikim profilom penetracije
FCAW	Visokoučinski MAG postupak kod kojeg se koriste žice punjene praškom (eng. Flux cored arc welding)
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv
$v_{\dot{z}}$	m/min	Brzina dodavanja žice
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja
I	A	Jakost struje
U	V	Napon
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
R_e	MPa	Granica razvlačenja
A_5	%	Istezljivost
T	°C	Temperatura

SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada opisan je MAG postupak zavarivanja, njegova povijest, parametri zavarivanja, načini prijenosa metala u električnom luku i oprema za zavarivanje. Uz to, opisani su modificirani postupci MAG zavarivanja temeljeni na modificiranim inačicama prijenosa metala u električnom luku koji su razvijeni s ciljem eliminacije nedostataka osnovnih načina prijenosa metala u električnom luku te povećanja produktivnosti i stabilnosti procesa zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada analizirana su dva spoja istog materijala jednakih debljina zavarena različitim postupcima. Prvi spoj zavaren je konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja uz prijenos metala štrcajućim lukom, dok je drugi spoj zavaren modificiranim MAG postupkom koji koristi prijenos metala zakopanim lukom. Analiza i usporedba zavarenih spojeva provedena je s ciljem dobivanja informacija o prikladnosti upotrebe modificiranog MAG postupka zavarivanja uz primjenu zakopanog luka kao zamjene za konvencionalni MAG postupak.

Ključne riječi: MAG, modificirani MAG postupci zavarivanja, zakopani luk.

SUMMARY

The theoretical part of the thesis describes the MAG welding procedure, its history, welding parameters, the modes of metal transfer and the welding equipment. In addition, the thesis describes the modified MAG welding processes based on modified modes of metal transfer that have been developed to eliminate the disadvantages of the basic transmission methods of the metal in the electrical harbor, and increase the productivity and stability of the welding process.

In experimental part of this thesis, two joints of the same material of the same thickness welded by different methods are analyzed. The first joint is welded by the conventional MAG welding process with the metal transfer of the spray transfer, while the second compound is welded with the modified MAG process that uses buried arc. The analysis and comparison of the welded joints was carried out with a view to obtaining information on the suitability of using the modified MAG welding process using a buried arc as a replacement for the conventional MAG process.

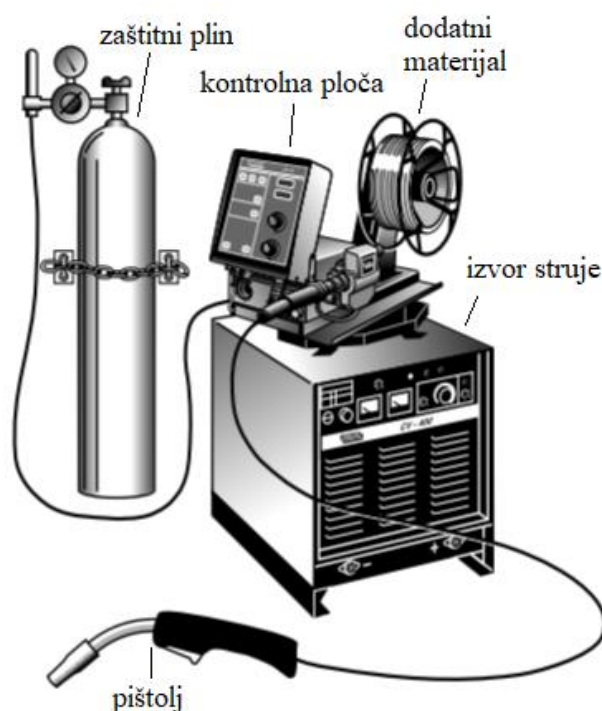
Key words: MAG, modified MAG welding processes, buried arc

1. UVOD

Zavarivanje je jedna od najzastupljenijih tehnologija spajanja materijala u industriji. Uslijed različitih zahtjeva, kao što su zahtjevi kvalitete i sigurnosti zavarenog spoja, smanjenje troškova, utroška materijala i energije te minimalno onečišćenje okoliša, razvijeni su brojni postupci zavarivanja. Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina (MAG zavarivanje) jedan je od najčešće korištenih postupaka zavarivanja. Ovaj postupak našao je široku upotrebu u industriji zbog svoje fleksibilnosti na području materijala koje je moguće zavarivati, različitih debljina materijala, načina prijenosa metala u električnom luku te izbora parametara zavarivanja, ali i zbog pogodnosti za mehanizaciju, automatizaciju i robotizaciju. Razvojem industrije i sve većim zahtjevima potiče se stalni razvoj MAG zavarivanja. Tako je razvijen veliki broj modificiranih postupaka MAG zavarivanja kojima se pokušava zadovoljiti zahtjeve kvalitete, brzine i eliminacije raznih problema. Visokoučinski postupci zavarivanja razvijeni su u svrhu ostvarivanja zahtijevane kvalitete i pouzdanosti zavarenog spoja te prihvatljive cijene zavarene konstrukcije uz povećanje produktivnosti zavarivanja koju karakteriziraju količina depozita, broj i duljina izvedenih zavara i vrijeme potrebno za zavarivanje. Najčešće korištene visokoučinske modifikacije MAG postupka zavarivanja su: FCAW, Tandem postupak, prijenos metala rotirajućim lukom i prijenos metala zakopanim lukom. Zakopani električni luk (eng. Buried arc) način je prijenosa metala kod kojeg je električni luk, zajedno s vrhom rastaljene žice, postavljen ispod razine površine rastaljenog metala zavara. Zbog toga se postiže veća penetracija što ga čini prikladnim za zavarivanje debljih materijala. Iako eliminira veliki broj nedostataka konvencionalnog MAG postupka zavarivanja na području zavarivanja debljih materijala, kao i neke od nedostataka ostalih postupaka zavarivanja koji se koriste za zavarivanje debljih materijala, zakopani luk rijetko je upotrebljavan u proizvodnji zbog podložnosti nestabilnom ponašanju. Brojnim istraživanjima na području tehnike stabilizacije zakopanog luka razvijen je visokoučinkoviti robotizirani sustav nazvan „D-Arc“ koji omogućuje zavarivanje nelegiranih čelika debljine do 20 mm u jednom prolazu. S ciljem dobivanja informacija o prikladnosti upotrebe modificiranog MAG postupka zavarivanja uz primjenu zakopanog luka kao zamjene za konvencionalni MAG postupak u radu je provedena analiza dva spoja istog materijala jednakih debljina zavarena različitim postupcima od kojih je jedan zavaren uz primjenu zakopanog luka.

2. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE TALJIVOM ELEKTRODOM U ZAŠTITNOJ ATMOSFERI AKTIVNOG PLINA (MAG ZAVARIVANJE)

Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (proces taljenja i shema uređaja prikazani su na slici 1.) je postupak zavarivanja taljenjem, gdje se električni luk uspostavlja i održava između kontinuirane, taljive elektrode (žice) i radnog komada. Prema normi *HRN EN ISO 4063:2012 Zavarivanje i srodni postupci - Nomenklatura postupaka i referentni brojevi* označava se oznakom 135.



Slika 1. Oprema za MAG zavarivanja [1]

Aktivni zaštitni plin koji se koristi u procesu je CO_2 , neka njegova mješavina s argonom, helijem, kisikom ili vodikom ili neka druga mješavina navedenih plinova, a njegova zadaća je zaštititi električni luk i rastaljeni metal od negativnog utjecaja okoline i ionizirati vodljivi prostor za održavanje električnog luka. Električni luk je snažno i trajno pražnjenje u ionizirajućem plinu između radnog komada i elektrode u obliku žice, koja je u pravilu spojena na „+“ pol istosmjernog (DC) izvora struje, u strujnom krugu. Proces se odvija tako da pogonski sistem konstantnom brzinom dodaje žicu u električni luk kroz polikabel i pištolj. Pri zavarivanju na udaljenosti većoj od 5 m od

izvora struje potrebno je koristiti dodatni pogon za dodavanje žice smješten u samom pištolju da bi se smanjio rizik gužvanja žice unutar cijevnog vodiča. Taj sistem naziva se „push-pull“, a koristi se i na manjim udaljenostima u slučaju rada sa žicama manjeg promjera (0,6 - 0,8 mm). Žica istovremeno obavlja zadaću elektrode i dodatnog materijala, odnosno njenim taljenjem popunjava se unaprijed pripremljeni žlijeb. MAG postupak lako je automatizirati i danas, ovisno o potrebi, postoji izbor između poluautomatskog (dodavanje žice je mehanizirano, a vođenje pištolja ručno), automatskog (glava pištolja pokretana je automatskim mehanizmom, a radni komad je nepomičan ili obratno) ili robotiziranog sustava za MAG zavarivanje. [2,3]

Prednosti MAG postupka zavarivanja [2]:

- postupak je primjenjiv za zavarivanje gotovo svih vrsta materijala
- veliki izbor parametara zavarivanja
- veliki izbor načina prijenosa metala
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- mogućnost zavarivanja u radionici i na terenu
- mogućnost primjene raznih plinskih mješavina
- mogućnost primjene praškom punjene žice
- širok raspon debljine materijala
- velika učinkovitost i proizvodnost
- moguća primjena za lemljenje
- pogodnost za automatizaciju.

Nedostaci MAG postupka zavarivanja [2]:

- otežana zaštita plinskom atmosferom na terenu
- problemi pri dovođenju žice
- greške uslijed neodgovarajuće tehnike i loše izabranih parametara zavarivanja
- pojava rasprskavanja prilikom zavarivanja kratkim spojevima
- relativno složen uređaj.

2.1. Povijest i razvoj MAG postupka zavarivanja

Godine 1953. u bivšem SSSR-u Lyubavshkii i Novoshilov razvili su MAG postupak zavarivanja. Proces nije bio upotrebljiv jer su zagrijani zaštitni plin (CO_2) i elektrode većeg promjera zahtijevali

visoke struje zavarivanja. To je potaklo razna istraživanja što dovodi do razvoja prijenosa metala kratkim spojevima koji omogućava zavarivanje u svim položajima i ubrzo postaje najpopularniji način prijenosa metala prilikom MAG zavarivanja. Već 1954. godine Bernard razvija postupak zavarivanja praškom punjenom žicom. Postupak je nazvan „Dualshield“ po tome što su u procesu bila dva plina (zaštitni plin i plin koji se razvija izgaranjem praška iz žice). 1959. godine u kompaniji Lincoln Electric proizvedena je žica koja izgaranjem tvori zaštitnu atmosferu i ne zahtijeva dodatnu vanjsku zaštitnu atmosferu plina. Taj proces nazvan je „Innershield“. [1,4]

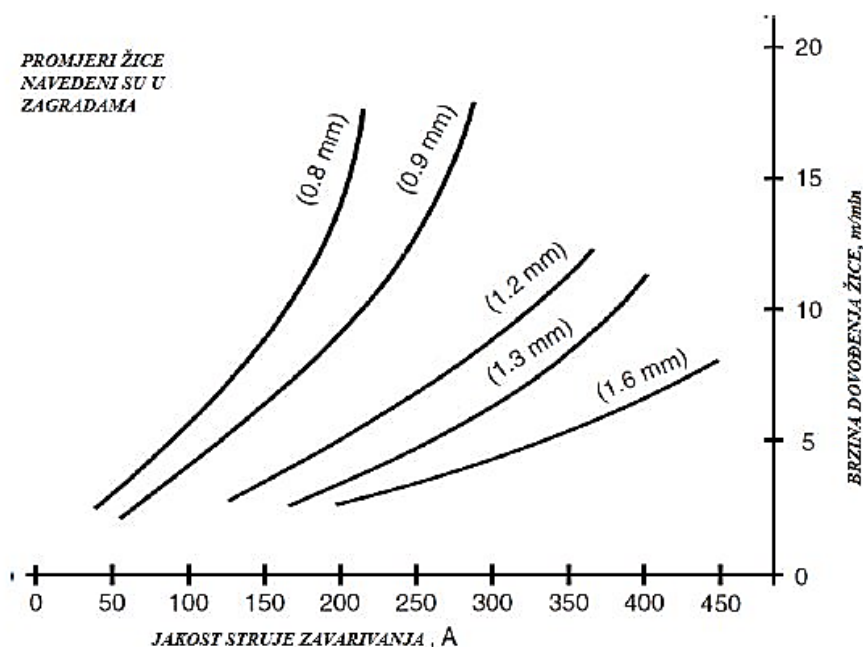
Početkom 1960-ih godina razvijen je prijenos metala impulsnim lukom koji prednosti prijenosa metala štrcajućim lukom objedinjuje s nižim unosom topline. Sljedećih godina nastavlja se veliki razvoj MAG zavarivanja impulsnim lukom na što poseban utjecaj ima pojava prvih tiristora. Institut za zavarivanje Ujedinjenog Kraljevstva zaslužan je za razvoj algoritma koji pokazuje linearnu povezanost frekvencije impulsnog luka i brzine dovođenja žice koji dovodi do razvoja izvora struje koji kontroliraju frekvenciju impulsa u odnosu na brzinu žice i istu korigiraju u odnosu na povećanje ili smanjenje brzine žice. [1]

U novije vrijeme razvija se sve više postupaka zavarivanja temeljenih na MAG postupku uz određene modifikacije. Modificirani MAG postupci omogućavaju razna poboljšanja u odnosu na konvencionalne MAG postupke (veća brzina zavarivanja, veća produktivnost, manji utrošak energije, ...).

2.2. Osnovni parametri MAG zavarivanja

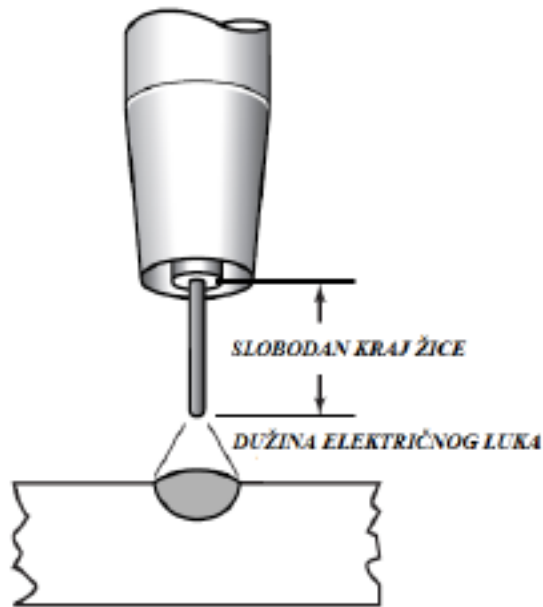
Parametri zavarivanja su čimbenici o kojima ovisi kvaliteta zavarenog spoja. Najvažniji parametri zavarivanja kod MAG postupka zavarivanja su [5]:

- jakost struje - o jakosti struje ovisi način na koji će se rastaljeni metal prenositi u električnom luku, stabilnost električnog luka, penetracija i količina taline. Sama jakost struje ovisi, odnosno određuje se prema promjeru žice, položaju zavarivanja te vrsti i debljini materijala, a razlikuje se i za različite načine prijenosa metala u električnom luku. Na slici 2. prikazana je ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini zavarivanja. [2,5]



Slika 2. Ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini zavarivanja [2]

- brzina zavarivanja - parametar o kojem ovisi produktivnost postupka zavarivanja i zbog toga ga treba pažljivo i pravilno odabrati. Odabir brzine zavarivanja ovisi o položaju zavarivanja. Izgled profila zavar direktno ovisi o brzini zavarivanja (povećanjem brzine zavarivanja zavar postaje uži, a penetracija manja, dok smanjenjem brzine zavarivanja zavar postaje širi, a penetracija veća). [2,3]
- slobodni kraj žice - slobodnim krajem žice naziva se dio žice od kraja kontaktne vodilice do početka električnog luka (dio koji je vidljiv zavarivaču) i njegova promjena utječe na jakost struje u električnom luku. Povećanjem slobodnog kraja žice povećava se otpor protoku struje što uzrokuje pad jakosti struje zavarivanja, a smanjenjem slobodnog kraja žice smanjuje se otpor protoku struje i dolazi do porasta jakosti struje zavarivanja. Da bi se održala konstantna vrijednost penetracije potrebno je slobodni kraj žice održavati konstantnim i izbjegavati njegovo smanjenje ili povećanje. Na slici 3. definiran je slobodni kraj žice. [2]



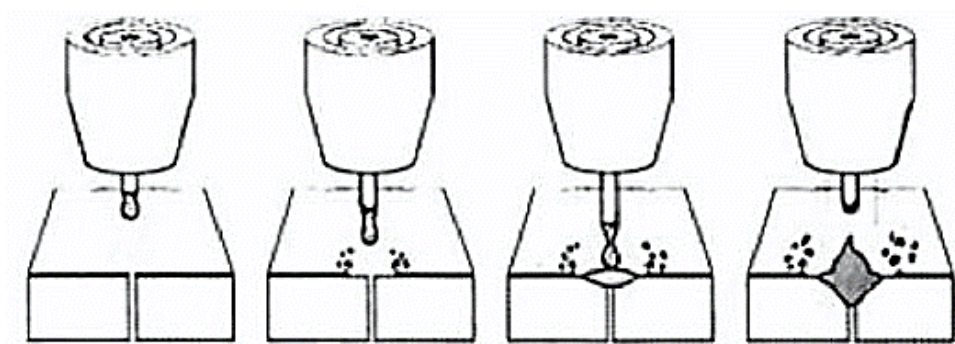
Slika 3. Slobodni kraj žice [2]

- napon - stabilnost električnog luka te njegova duljina i širina direktno ovise o naponu. Veći napon uzrokuje dulji električni luk čime se dobiva širi zavar uz manju penetraciju. Iznos napona drugačiji je za različite načine prijenosa metala. [2,3]
- induktivitet - najveći utjecaj ima kod prijenosa metala kratkim spojevima (povećanjem induktiviteta smanjuje se frekvencija kapljica, a njegovim smanjenjem frekvencija kapljica se povećava). [2]
- protok zaštitnog plina - parametar koji ima veliki utjecaj na oblik profila zavora (širinu i penetraciju), brzinu zavarivanja i stabilnost električnog luka. Zadaća zaštitnog plina je čuvati područje zavora od negativnog utjecaja plinova iz atmosfere. Protok zaštitnog plina regulira se u odnosu na jakost struje zavarivanja, uvjete u kojima se vrši zavarivanje i karakteristike spoja koji se zavaruje. Za veću struju zavarivanja potreban je i veći protok zaštitnog plina. [2,3]

2.3. Načini prijenosa metala u električnom luku

Način prijenosa metala u električnom luku ovisi o naponu i jakosti struje, vrsti zaštitnog plina, polaritetu i dodatnom materijalu, a može biti prijenos metala slobodnim letom ili premošćivanjem. Kod MAG postupka zavarivanja razlikuju se četiri načina prijenosa metala u električnom luku [2,4,7]:

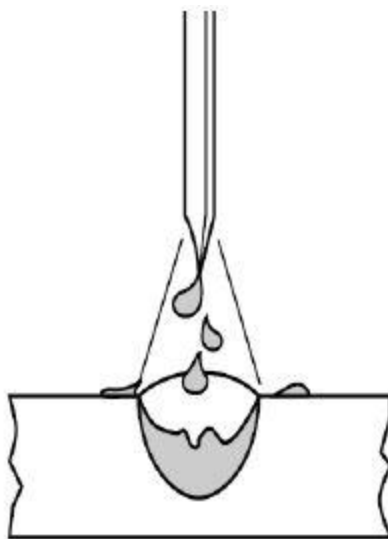
- 1) kratkim spojevima - prijenos metala kod kojeg se kontinuirano dobavljana žica tali uslijed kratkih spojeva. Karakteristika prijenosa metala kratkim spojevima je mali unos topline, a najveći utjecaj na uspješnost izvođenja imaju promjer elektrode i vrsta zaštitnog plina. Karakteristične vrijednosti napona (13 - 21 V) i jakosti struje zavarivanja (50 - 170 A) manje su od napona i jakosti struje zavarivanja kod ostalih načina prijenosa metala. Pri stabilnim parametrima u sekundi se dogodi između 100 i 200 kratkih spojeva. Na slici 4. prikazane su faze koje se pojavljuju kod prijenosa materijala kratkim spojevima.



Slika 4. Prijenos metala kratkim spojevima [6]

Ovaj prijenos metala pogodan je za zavarivanje tanjih materijala (0,6 - 5,0 mm) zbog malog unosa topline. Promjeri elektroda koje se koriste pri zavarivanju kratkim spojevima kreću se između 0,6 mm i 1,2 mm. Plinovi koji se najčešće koriste su 100 % CO₂, mješavina 75-80 % Ar sa 20-25 % CO₂, a manje se koriste mješavine Ar i O₂ i posebne mješavine Ar, CO₂ i O₂. Prednosti ovog načina prijenosa metala su: mogućnost zavarivanja u svim položajima, dobro podnosi greške u pripremi zavora, manje su deformacije zavora zbog manjeg unosa topline. Nedostaci su: potrebno je zaštititi područje zavarivanja od vjetrova kod rada na terenu, uslijed lošeg vođenja procesa dolazi do rasprskavanja i nedovoljnog protaljivanja, pogodan samo za tanje materijale.

- 2) prijelaznim lukom - prijenos metala kod kojeg se kontinuirano dobavljana žica tali uslijed kombiniranog djelovanja kratkih spojeva i načina prijenosa metala štrcajućim lukom. Karakteristične vrijednosti napona (22 - 25 V) i jakosti struje zavarivanja (170 - 235 A) nešto su veće nego kod prijenosa metala kratkim spojevima što uzrokuje veće, nepravilno oblikovane kapljice (promjer im je veći od promjera elektrode). Slikom 5. prikazan je prijenos metala prijelaznim lukom.

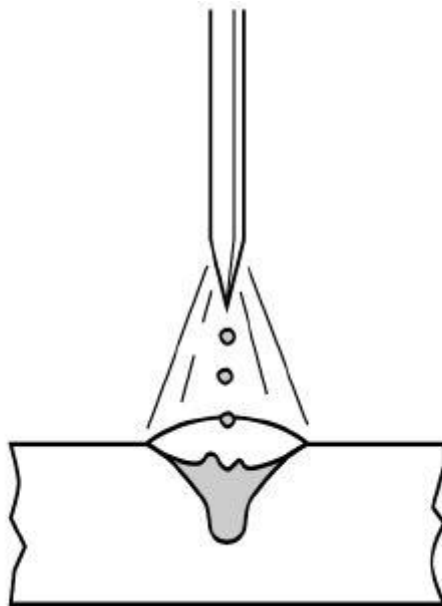


Slika 5. Prijenos metala prijelaznim lukom [2]

Najčešće korišteni zaštitni plin je 100 % CO₂, a moguće je koristiti i mješavinu argona i CO₂. U današnje vrijeme način prijenosa metala prijelaznim lukom potpuno je istisnut iz upotrebe zbog problema s nestabilnosti procesa uslijed izmjenjivanja načina prijenosa metala kratkim spojevima i štrcajućim lukom. Prednosti ovog načina prijenosa metala su: jeftiniji zaštitni plin, mogućnost zavarivanja velikim brzinama, jeftina oprema za zavarivanje i jeftin dodatni materijal. Nedostaci su: potreba za skupom naknadnom obradom nakon zavarivanja zbog jakog rasprskavanja metalnih kapljica koje karakterizira ovaj način prijenosa metala i manja iskorištenost elektrode u odnosu na ostale postupke.

- 3) štrcajućim lukom - prijenos metala čija je karakteristika veliki unos topline uslijed koje se tali kontinuirano dobavljana žica. Talina u obliku malih kapljica slobodnim letom putuje električnim lukom, a elektroda pritom ne dodiruje radni komad. Karakteristične vrijednosti

napona (25 - 40 V) i jakosti struje zavarivanja (200 - 600 A) veće su u odnosu za iznad opisane načine prijenosa metala. Slikom 6. prikazan je prijenos metala štrcajućim lukom.

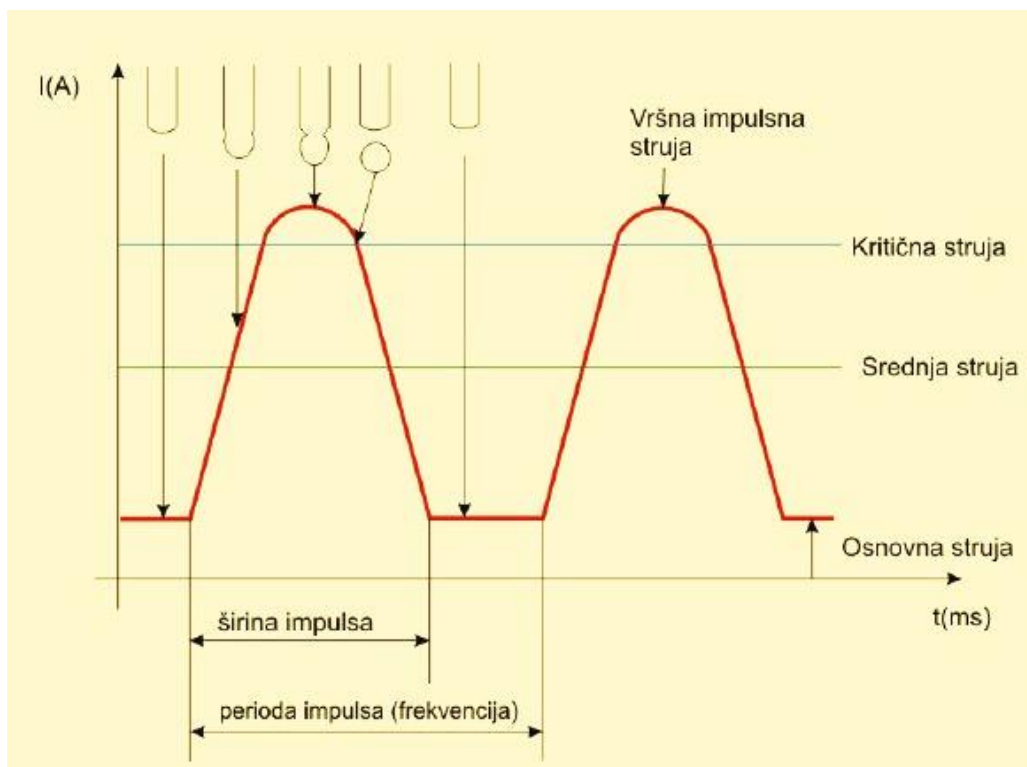


Slika 6. Prijenos metala štrcajućim lukom [2]

Zaštitni plinovi koji se koriste su mješavina argona i 1,5 % O_2 i mješavina argona i CO_2 kod koje mora biti manje od 18 % CO_2 . Ovaj načina prijenosa metala koristi se za zavarivanje ugljičnih čelika, visokolegiranih čelika i legura nikla. Prednosti ovog načina prijenosa metala su: ne zahtijeva naknadno čišćenje jer nema rasprskavanja, omogućava veliki depozit uz veliku iskorištenost elektrode (više od 98 %), korištenje širokog spektra dodatnih materijala i raspona promjera žice te ga je vrlo lako automatizirati. Nedostaci su: mogućnost primjene samo na debljim materijalima, nemogućnost zavarivanja u svim položajima i skuplji zaštitni plinovi u odnosu na iznad opisane načine prijenosa metala.

- 4) impulsnim lukom - način prijenosa metala koji se može nazvati i visoko kontrolirana verzija štrcajućeg luka. Izvor struje generira promjenjiv oblik struje zvan impuls. Jakost struje u jednom impulsu mijenja se od vršne vrijednosti (maksimalna vrijednost jakosti struje) do vrijednosti osnovne struje. U trenutku kada iznos struje dosegne vršnu vrijednost impulsne struje odvaja se jedna kapljica dodatnog materijala koja slobodnim letom putuje duž električnog luka. Nakon odvajanja samo jedne kapljice vrijednost struje pada na

osnovnu vrijednost koja osigurava stabilnost električnog luka i srednju vrijednost unosa topline. Srednja struja zavarivanja regulira se kombinacijom frekvencije impulsnog zavarivanja (koja proporcionalno raste s brzinom dovođenja žice) i brzinom dovođenja žice. Zavarivanjem impulsnim lukom moguće je zavarivati široki spektar debljine osnovnog materijala. Oblik impulsa može biti sinusoidalni (najjednostavnije ga je proizvesti), trokutasti ili četvrtasti (najpovoljniji za upravljanje procesom). Na slici 7. prikazana je ovisnost struje zavarivanja o vremenu pri prijenosu metala impulsnim lukom.



Slika 7. Prijenos metala impulsnim lukom - promjena struje zavarivanja ovisno o vremenu [7]

Podešavanje parametara kod ovog načina prijenosa metala prilično je komplicirano i složeno jer treba uskladiti pet osnovnih parametara: vrijednost osnovne struje (služi za onemogućavanje gašenja luka nakon prestanka impulsa i podešava se na što manju vrijednost, najčešće se kreće u granicama između 20 A i 50 A), vrijednost vršne struje (određuje se prema vrsti osnovnog materijala, promjeru žice i mješavini zašitnog plina, najčešće u granicama između 250 A i 650 A), širina impulsa (odabire se tako da omogući odvajanje samo jedne kapljice tijekom trajanja impulsa, najčešće u granicama između 1 ms

i 3 ms), frekvencija (parametar koji predstavlja broj kapljica u sekundi i odabire se tako da kod određene brzine žice odvajanje kapljica bude stabilno, najčešće u području između 20 Hz i 300 Hz) i brzina dodavanja žice (parametar kojem je podređeno podešavanje svih ostalih parametara i kojim se određuje količina rastaljenog metala, ovisi o promjeru žice i kreće u granicama između 2 m/min i 15 m/min) i to u današnje vrijeme obavljaju elektronički programirani uređaji (za jednu izabranu vodeću veličinu biraju optimalnu kombinaciju ostalih parametara). Dodatni materijali koji se najčešće koriste su pune elektrode (promjera od 0,8 mm do 1,6 mm) i praškom punjene elektrode (promjera od 1,2 mm do 2,0 mm), a zaštitni plinovi u kojima se postiže način prijenosa metala impulsnim lukom su plinske mješavine bogate argonom (kod ugljičnih čelika mogu se koristiti i plinske mješavine s maksimalno 18 % CO₂). Prednosti ovog načina prijenosa metala: mogućnost primjene u svim položajima zavarivanja i za materijale osjetljive na količinu unesene topline (manji unos topline), moguće je istim promjerom žice zavarivati širi raspon debljine materijala, vrlo malo rasprskavanja, mogućnost automatiziranja, mogućnost postizanja velikih brzina zavarivanja i velika iskorištenost elektrode. Nedostaci su: skupa oprema, skupe zaštitne plinske mješavine i potrebna dodatna zaštita zavarivača (veća energija električnog luka).

2.4. Oprema za MAG zavarivanje

Oprema za MAG postupak zavarivanja sastoji se od izvora struje, sustava za dovod dodatnog materijala, sustava za dovod zaštitnog plina, upravljačkog sustava, pištolja za zavarivanje te odgovarajućeg sustava za hlađenje pištolja. Složenost uređaja može se kretati od jednostavnih do programabilnih uređaja s ugrađenim računalom i bazom podataka parametara zavarivanja na što najviše utječu zahtjevi korisnika. [5]

2.4.1. Izvori struje za MAG zavarivanje

Raspoloživu električnu energiju iz mreže nije moguće direktno koristiti za snabdijevanje luka energijom zbog njegove karakteristike. Električni luk za svoje održavanje treba relativno jaku struju (nekoliko desetaka do nekoliko stotina A) pri niskom naponu (nekoliko desetaka V), dok je u mreži

suprotna situacija. Iz toga dolazi potreba za posebno konstruiranim uređajima koji prilagođavaju raspoloživu energiju u odgovarajući oblik. [4]

Izvori struje dijele se na izmjenične (AC) i istosmjerne (DC). Kod MAG postupka zavarivanja električni luk održava se istosmjernim izvorima struje, a oni su [4]:

- generatori istosmjerne struje
- ispravljači
- inverteri (najčešće korišteni).

Inverterska tehnologija razvijena je korištenjem visoko energetske poluvodiča, kao što su IGBT, kako bi bilo moguće napraviti prekidački izvor napajanja koji ima mogućnost da podnese velika strujna opterećenja izazvana procesom zavarivanja. Inverter je elektronički sklop koji najprije pretvara izmjeničnu struju u istosmjernu. Nakon toga, tranzistorske sklopke brzim prebacivanjem iz područja zapiranja u područje zasićenja stvaraju visokofrekventni napon. Frekvencije izvora izmjenične struje ove vrste su najčešće između 10 kHz i 20 kHz. Prolaskom kroz transformator te struje postaju struje nižih frekvencija, ali znatno veće jakosti struje. [8]

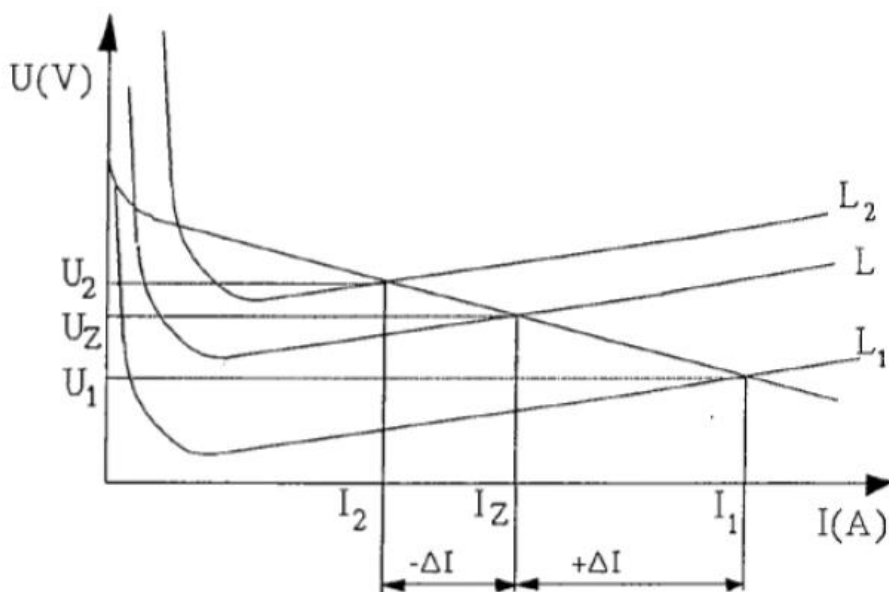
Statička karakteristika izvora struje je operativna karakteristika mjerena pod konstantnim opterećenjem izvora struje za zavarivanje u svrhu promatranja ponašanja navedenog izvora pod različitim strujnim opterećenjima. Statičke karakteristike dijele se na [8]:

- strmopadajuća - konstantna jakost struje
- ravna - konstantan napon struje.

Kod ravne karakteristike koja se koristi kod MAG postupka zavarivanja jačina struje se mijenja s visinom električnog luka, a izvor struje održava napon struje konstantnim. Karakteristika se još naziva i blagopadajuća zbog toga što (iako se uzima da je krivulja konstantna) krivulja ipak pokazuje blagi pad uzrokovan unutarnjim otporima građe izvora struje za zavarivanje. Kod ravne karakteristike težnja je održati konstantnu visinu luka, jer bilo kakva promjena visine luka povlači za sobom promjenu jakosti struje što rezultira velikom promjenom depozita u zavaru. Zbog toga se primjenjuje automatska regulacija dužine električnog luka. Kod MAG postupka koristi se unutarnja ili strujna regulacija. [8]

Ako se duljina električnog luka poveća potreban je veći napon za održavanje luka pa se njegova karakteristika pomiče prema gore (L_2), što znači da nastane trenutna ravnoteža. U tom slučaju struja se smanji za $-\Delta I$, što znači da se smanjila količina generirane topline. Zbog nedovoljne količine topline brzina taljenja žice je manja od prethodno namještene (dodaje se više žice nego što se stigne rastaliti) te se vrh žice spušta prema radnom komadu i električni luk se skraćuje. Analogno vrijedi i za smanjenje duljine električnog luka. Takav efekt se naziva „samoregulacija“ električnog luka i on se ostvaruje sa pomoću elektromotora za dodavanje žice koji je reguliran izlaznim naponom izvora struje koji zbog slabijeg intenziteta promjene osigurava sporiju reakciju dodavanja žice što znači i veću stabilnost procesa, dok intenzivnija promjena jakosti struje utječe na brzinu taljenja žice. [8]

Na slici 8. prikazana je blagopadajuća karakteristika izvora struje za zavarivanje.



Slika 8. Blagopadajuća karakteristika izvora struje za zavarivanje [4]

2.4.2. Sustav za dovod dodatnog materijala

Automatsko dodavanje žice kod MIG postupka obavlja sustav za dobavu žice. Glavni parametri na koje je moguće utjecati putem dodavača žice su slobodni kraj žice i brzina dodavanja žice. Dodavači žice u najvećem broju slučajeva su zasebne jedinice, montirane izvan kućišta što daje nekoliko prednosti kao što su mogućnost rotacije modula s obzirom na izvor struje zavarivanja i bolja preglednost namotaja žice. [8]

Na slici 9. prikazani su najvažniji dijelovi dodavača žice.



Slika 9. Najvažniji dijelovi dodavača žice [8]

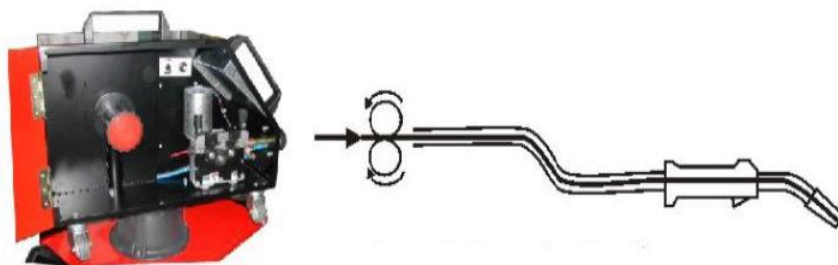
1. Elektromotor za dodavanje žice
2. Pogonski zupčanik za dodavanje žice
3. Pogonjeni zupčanci s profilima za vođenje žice
4. Pogonjeni zupčanci s profilima za vođenje žice sa zatezačima
5. Kotačići za uvođenje u polikabel
6. Uvodnica u polikabel
7. Zatezači kotačića za dodavanje žice

Tri najčešće korištena načina za dodavanje (vođenje) žice su [4,9]:

- „Push“ - žica se kontroliranom brzinom gura pomoću pogonskih kotačića kroz vodilicu žice u pištolju do samog mjesta zavarivanja. Kontrolirana brzina osigurava se elektronički reguliranim istosmjernim motorom, a siguran pogon osigurava se sa dva ili četiri pogonska kotačića (valjka), koji žicu vode i guraju kroz kalibrirane utore (specijalni V ili U za aluminij) čije dimenzije i oblik ovise o materijalu i promjeru žice. Kod kompaktnih uređaja pogonski sustav ugrađuje se u zajedničko kućište, dok se kod modularnih uređaja ugrađuje u posebno kućište uređaja za dodavanje žice. Ovaj način omogućava efikasan rad s žicama promjera

1,2 - 2,4 mm za aluminij i njegove legure, a sve vodilice u sustavu najčešće su teflonske, poliamidne ili grafitne. Dodavanje žice guranjem omogućava sigurno dodavanje na udaljenostima do tri metra od izvora i najčešće se koristi u praksi, a pogotovo kod impulsnih izvora.

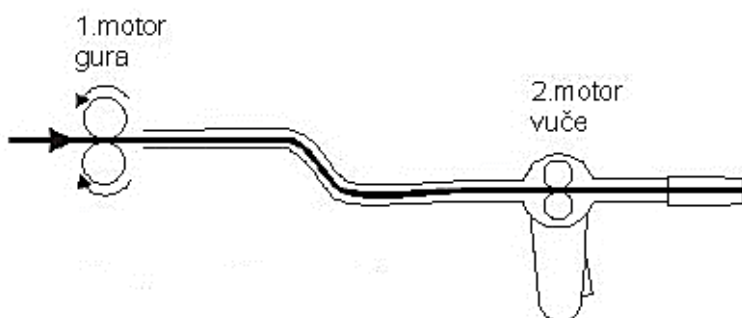
Na slici 10. prikazan je „push“ sustav za dodavanje žice.



Slika 10. Sustav za dodavanje žice „push“ [9]

- „Push-pull“ - žica se kontroliranom brzinom gura („push“) pomoću pogonskih kotačića kroz vodilicu žice do pogonskih kotačića u pištolju, koji žicu vuku („pull“) do mjesta zavarivanja. U ovom slučaju drugi pogonski motor smješten je u ručku pištolja, a po izvedbi može biti električni ili zračni. Prednost „push-pull“ sustava je stalna zategnutost žice u vodilici čime se omogućava sigurno dodavanje i kod žica manjih promjera (0,8 mm) i na većim udaljenostima od izvora (do 15 m). Nedostaci ovog načina dodavanja žice su njegova cijena i težina sustava pištolj/kabel, naročito kod većih struja i udaljenosti, što je razlog korištenja ovog sustava uglavnom kod zavarivanja aluminija i njegovih legura na konstrukcijama gdje druga rješenja nisu moguća.

Na slici 11. prikazan je „push-pull“ sustav za dodavanje žice.



Slika 11. Sustav za dodavanje žice „push-pull“ [9]

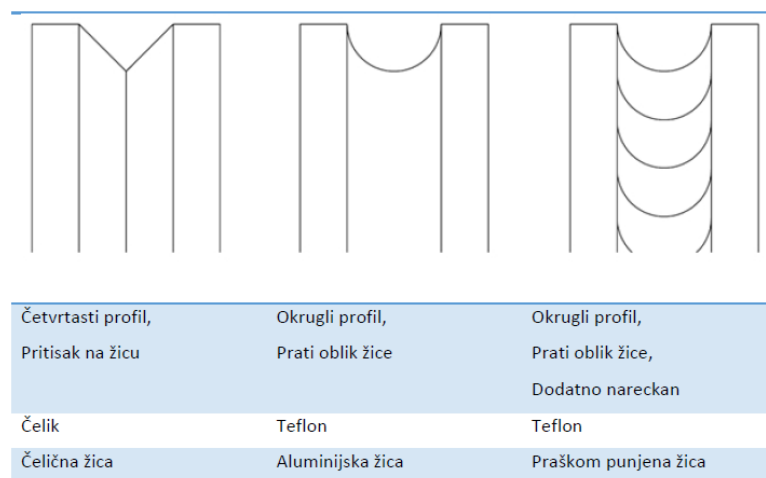
- „Spool gun“ - posebna izvedba pištolja kod koje se pogon nalazi samo u ručki pištolja. Žica je također smještena na ručki pištolja na manjem kolutu (kolut je promjera 100 mm i sadržava do 0,5 kg žice). Ovaj način koristi se samo za male promjere žice i to pretežno za aluminij (0,6 - 1,0 mm). Moguće ga je koristiti bez većih problema do 15 m od izvora.

Na slici 12. prikazan je „spool gun“ pištolj.

**Slika 12. „Spool gun“ pištolj [9]**

Kotačići za dodavanje žice i uvodnica, koji odmotavaju žicu, ravnaju je i uvode u bužir unutar polikabela, odabiru se prema vrsti dodatnog materijala. Cilj je odabrati kotačiće veće ili jednake tvrdoće od tvrdoće žice čime se osigurava da kotačići ne unište žicu tijekom dovođenja do sapnice pištolja za zavarivanje. Tijekom rada odvija se toplinsko rastezanje žice u svim smjerovima. Ta pojava izraženija je kod aluminija zbog njegove manje tvrdoće i većeg koeficijenta toplinskog rastezanja u usporedbi s čelikom. To je razlog zbog kojeg se kod zavarivanja aluminija odabiru kotačići s okruglim profilom. [8]

Na slici 13. usporedni je prikaz tri tipa kotačića za izravnavanje žice.

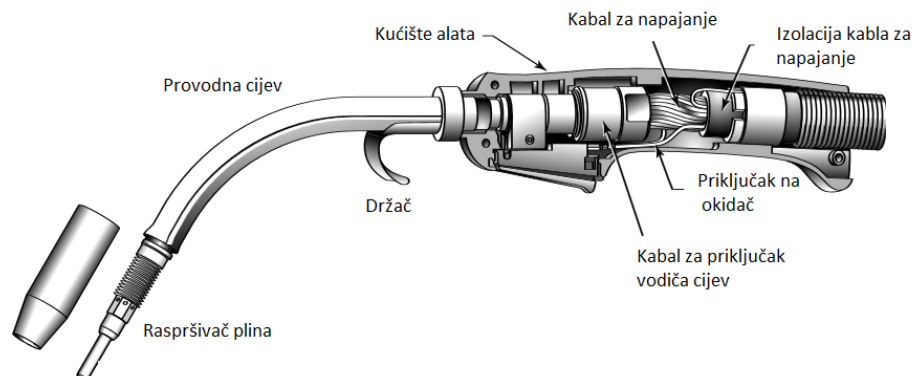


Slika 13. Usporedni prikaz tipova kotačića za izravnavanje žice [8]

2.4.3. Polikabel i pištolj za zavarivanje

Pištolj za zavarivanje dovodi dodatni materijal, struju i zaštitni plin u električni luk dok polikabel objedinjuje više manjih vodiča koji služe za dodavanje dodatnog materijala, zaštitnog plina i električne energije čime se omogućava ostvarivanje procesa zavarivanja. [8]

Na slici 14. prikazan je presjek pištolja za MAG zavarivanje.



Slika 14. Prikaz presjeka pištolja za MAG zavarivanje [2]

Na količinu dobavljene električne energije kroz kabel utječe nekoliko čimbenika: promjer vodiča, duljina kabla, otpor vodiča, granična temperatura izolacije polikabela i temperatura okoliša. Kraći kabeli mogu podnijeti veća strujna opterećenja nego dulji kabeli istog promjera vodiča struje (razlog

tome je otpor koji se s duljinom povećava do mjere gdje temperatura vodiča tali izolaciju). To je razlog gradiranja polikabela prema temperaturi koju mogu podnijeti unutrašnje izolacije vodiča: 75 °C, 90 °C i 105 °C. Uz pravilan odabir polikabela potrebno je paziti i na okolišnu temperaturu jer se smanjuje provodnost struje ukoliko je temperatura u pogonu na 30 °C ili više iz razloga što količina topline koju kabel može predati u okolinu nije dovoljna da ga rashladi. [8]

2.4.4. Sustav za dovod zaštitnog plina

Veliki utjecaj na kvalitetu zavora ima zaštitni plin. Za dovod zaštitnog plina u električni luk zadužen je sustav koji se sastoji od [2,5]:

- redukcijskog ventila s mjerачem protoka – ventili se priključuju na bocu sa zaštitnim plinom, a protok plina se podešava na regulatoru protoka na ventilu
- elektromagnetskog ventila za otvaranje i zatvaranje protoka
- polikabela i pištolja za zavarivanje kroz koje plin dolazi do električnog luka.

2.4.5. Upravljački sustav uređaja za MAG zavarivanje

Upravljački sustav uređaja u najvećem broju slučajeva izvodi se elektronički i kontrolira [5]:

- način uključivanja izvora struje zbog uspostavljanja i gašenja električnog luka
- protok zaštitnog plina
- dodavanja dodatnog materijala.

Kod potpuno elektronički upravljanih uređaja, upravljački sustav služi i za održavanje zadanih parametara zavarivanja te za kontrolirani prijenos kapljica kroz električni luk. [5]

3. MODIFICIRANI POSTUPCI MAG ZAVARIVANJA

Modificirani postupci MAG zavarivanja razvijeni su na temelju modifikacija načina prijenosa metala u električnom luku koje je omogućio razvoj inverterskih izvora struje za MAG zavarivanje. Cilj razvoja modificiranih načina prijenosa metala u električnom luku je eliminacija nedostataka osnovnih načina prijenosa metala u električnom luku te veća produktivnost i stabilnost procesa zavarivanja. [8]

3.1. Modificirani prijenos metala kratkim spojevima

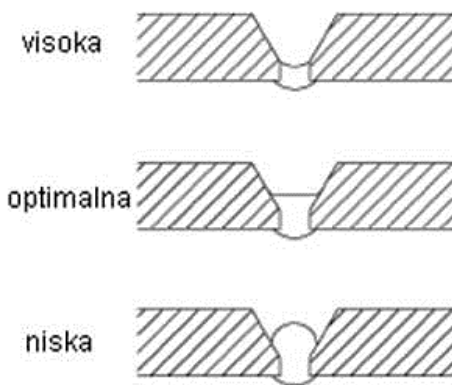
Zbog svojih prednosti (mogućnost zavarivanja u svim položajima, manji unos topline, manje deformacija) klasični prijenos metala kratkim spojevima najčešće je korišten način prijenosa metala u električnom luku kod MAG postupka zavarivanja. Da bi se smanjio utjecaj njegovih nedostataka (nedovoljna penetracija, rasprskavanje, stabilnost procesa) nastoji ga se modificirati. Najčešće korišteni modificirani MAG postupci zavarivanja temeljeni na modifikacijama prijenosa metala kratkim spojevima su: STT[®], CMT[®], FastROOT[®] i CBT[®]. Njihove prednosti su mali unos topline, jednolika penetracija, veća kontrola i stabilnost procesa i smanjeno neželjeno rasprskavanje. [10]

3.1.1. *Surface Tension Transfer*[®]

STT (eng. Surface Tension Transfer) je modificirani postupak MAG zavarivanja koji za finu regulaciju odvajanja rastaljene kapljice koristi mehanizam površinske napetosti. Najčešće se koristi za zavarivanje korijena zavora u otvorenom žlijebu, i to najčešće cijevnih elemenata u prehrambenoj, procesnoj i automobilske industriji. Materijali pogodni za zavarivanje STT postupkom su konstrukcijski čelici, visokočvrsti čelici te nehrđajući čelici. Izvor struje kod STT postupka kontrolira električni luk uz vrlo preciznu kontrolu struje zavarivanja. Maksimalni iznos jakosti struje je u trenutku kada je za prijenos metala dovoljan samo mehanizam površinske napetosti te se na taj način izbjegava rasprskavanje kapljice metala i daljnji unos topline (to bi bila posljedica daljnjeg povećanja jakosti struje u kratkom spoju što je slučaj kod konvencionalog MAG postupka). Nakon odvajanja rastaljene kapljice počinje ponovno povećanje jakosti struje (strujni impuls), odnosno novi ciklus.

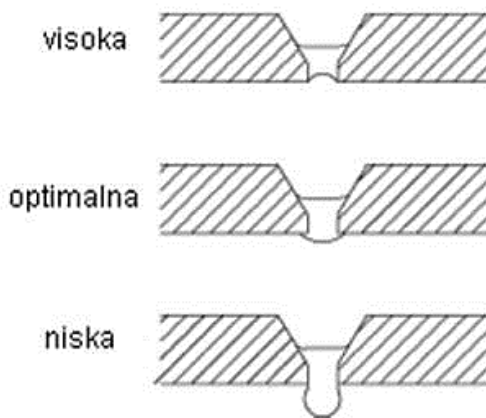
Parametri koji se reguliraju kod STT postupka zavarivanja su [8,10-12]:

- vršna struja (eng. Peak current) – koristi se za definiciju duljine električnog luka i staljivanje s osnovnim materijalom. Ako je vršna struja previsoka, kapljica rastaljenog metala biti će prevelika. Slika 15. prikazuje utjecaj vršne struje na geometriju zavora.



Slika 15. Utjecaj vršne struje na geometriju zavora [14]

- osnovna struja (eng. Background current) – koristi se za definiciju penetracije u osnovni materijal i osigurava unos topline u zavareni spoj. Naziva se još i pozadinska struja. Slika 16. prikazuje utjecaj osnovne struje na geometriju zavora.

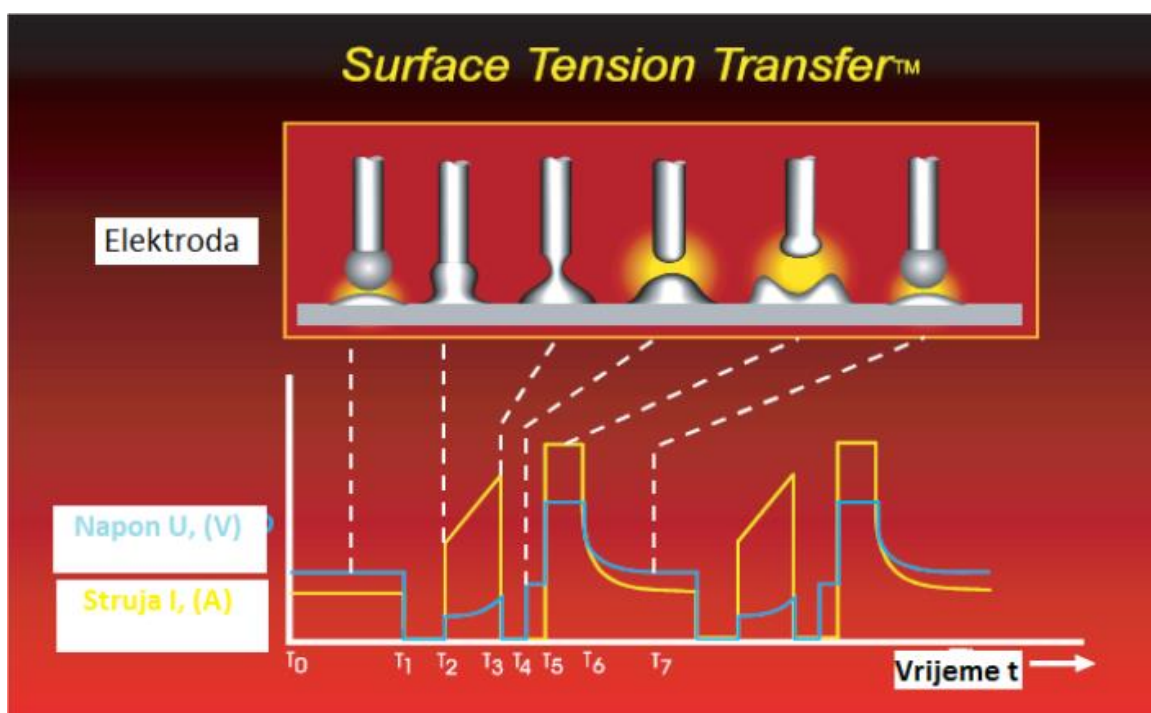


Slika 16. Utjecaj osnovne struje na geometriju zavora [14]

- topli start (eng. Hot start) – utječe na uspostavu električnog luka i povećava unos topline prilikom njegovog uspostavljanja čime se sprječava pojava naljepljivanja

- brzina pada struje (eng. Tail-out speed) – brzina kojom struja pada s vrijednosti vršne struje na vrijednost osnovne struje. Povećanjem brzine pada struje povećava se brzina zavarivanja te osigurava dodatni unos topline.
- nagib strujnog impulsa – bitno utječe na unos topline u zavareni spoj
- brzina žice – utječe na količinu rastaljenog metala
- slobodni kraj žice – utječe na geometriju zavora.

Na slici 17. prikazane su dinamičke karakteristike STT postupka zavarivanja te podjela cijelog procesa na šest faza što je objašnjeno ispod slike. [10,11]



Slika 17. Prikaz dinamičkih karakteristika STT postupka [11]

1. $T_0 - T_1$: Ovaj period odnosi se na električni luk u mirnom stanju, prije kratkog spoja, dok žica prilazi radnom komadu. U ovom periodu stvara se jednolika kapljica rastaljenog metala. Jakost struje iznosi između 50 A i 100 A i naziva se osnovna struja.
2. $T_1 - T_2$: U trenutku kada se kapljica kratko spoji s talinom dolazi do pada jakosti struje i napona. Jakost struje pada s vrijednosti osnovne struje na vrijednost 10 A na otprilike 0,75 ms što omogućava da formirana kapljica nakvasi talinu.

3. $T_2 - T_3$: U ovom periodu kontinuirano se povećava jakost struje dok je elektroda u kratkom spoju s radnim komadom. Volumen kapljice se povećava, a presjek koji spaja kapljicu i elektrodu smanjuje sve do trenutka T_3 . Dolazi do pojave „pinch“ efekta.
4. $T_3 - T_4$: U trenutku kada je kapljica taline pred odvajanjem, struja pada čime se izbjegava pojava rasprskavanja. U trenutku T_4 dolazi do odvajanja kapljice rastaljenog metala što traje do trenutka T_5 .
5. $T_5 - T_6$: U ovom periodu dolazi do naglog, ali kontroliranog povećanja struje do vršne vrijednosti što rezultira brzim taljenjem elektrode. Kreće formiranje nove kapljice koja je u ovom trenutku nepravilna.
6. $T_6 - T_7$: Period koji se naziva još i „tail-out“ period. Jakost struje pada s vrijednosti vršne struje na vrijednost osnovne struje. Ta promjena nije skokovita. Nakon ovog perioda dolazi do ponavljanja cijelog ciklusa koji traje između 25 ms i 35 ms.

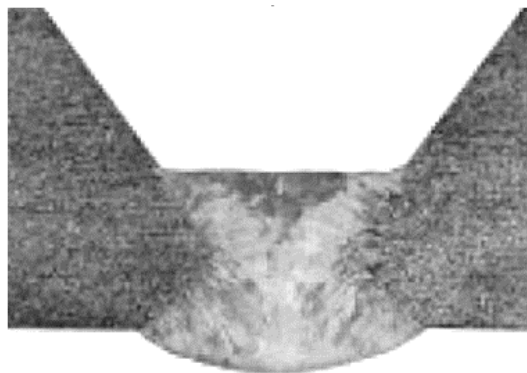
Prednosti STT postupka zavarivanja [11,12,15]:

- veća brzina zavarivanja u odnosu na konvencionalni MAG postupak
- manji unos topline nego kod konvencionalnog MAG zavarivanja
- odvajanje kapljice bez rasprskavanja
- nizak udio difundiranog vodika
- lako rukovanje
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- odlična kontrola taline.

Nedostaci STT postupka zavarivanja [10,11]:

- viša cijena opreme u usporedbi s opremom za konvencionalno MAG zavarivanje
- mogućnost prijenosa metala samo kratkim spojevima
- postupak se upotrebljava samo u kombinaciji s nekim visokoučinskim postupkom zavarivanja za popunu žlijeba
- nije moguće zavarivati aluminij.

Na slici 18. prikazan je izbrusak korijenskog prolaza zavaren STT postupkom zavarivanja.

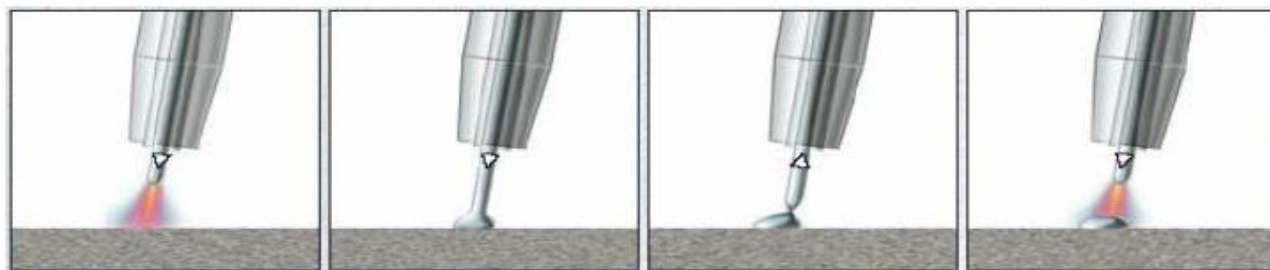


Slika 18. Izbrusak korijenskog prolaza zavarenog STT postupkom [11]

3.1.2. Cold Metal Transfer®

CMT (eng. Cold Metal Transfer – hladni prijenos metala) modificirani je MAG postupak zavarivanja kod kojeg se žica dodaje oscilatorno. Ona se frekvencijom od oko 70 Hz primiće i odmiće od radnog komada. Primicanje žice radnom komadu traje dok se ne ostvari kratki spoj, nakon čega žica mijenja smjer i odmiće se od radnog komada čime se olakšava prijenos rastaljenog metala pomoću površinske napetosti taline. Prekidom kratkog spoja žica ponovno mijenja smjer i započinje novi ciklus. Prijenos metala kod CMT postupka zavarivanja odvija se uz vrlo malu struju zavarivanja što rezultira smanjenjem unosa topline u odnosu na konvencionalni MAG postupak zavarivanja. Ovaj postupak najčešće se upotrebljava u automobilske i zrakoplovnoj industriji za zavarivanje tankih limova te za zavarivanje čelika i aluminija. [8,13,16]

Na slici 19. prikazane su faze CMT postupka zavarivanja.



Slika 19. Faze CMT postupka zavarivanja [13]

Prednosti CMT postupka zavarivanja [8,13,17]:

- mali unos topline
- velika brzina zavarivanja
- prijenos metala u talinu bez pojave rasprskavanja
- kontrolirano i točno upravljanje duljinom električnog luka
- dobra kvaliteta zavara
- mogućnost zavarivanja tankih limova (i do 0,3 mm)
- mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala.

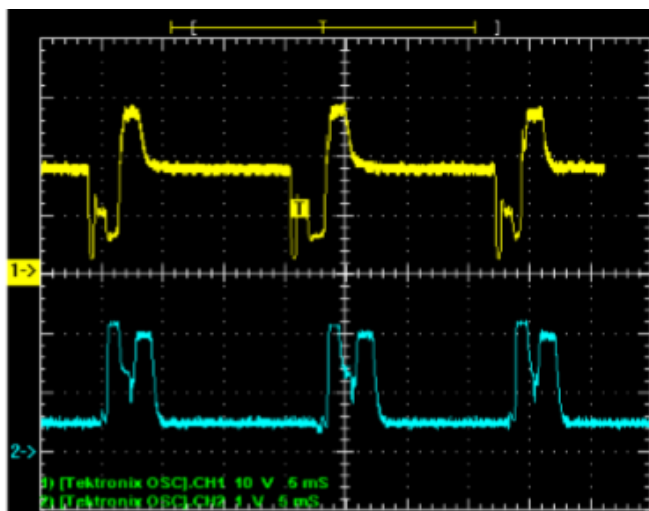
Nedostaci CMT postupka zavarivanja [8,13,17]:

- ne može se primjenjivati pri većim strujama zavarivanja
- ne može se primjenjivati pri većim debljinama materijala
- potreban je poseban pištolj za zavarivanje koji omogućava pomicanje žice i prekidanje struje tijekom zavarivanja (problem mogućeg gužvanja žice prilikom povlačenja riješen je ugradnjom kompenzatora povrata žice).

3.1.3. FastROOT®

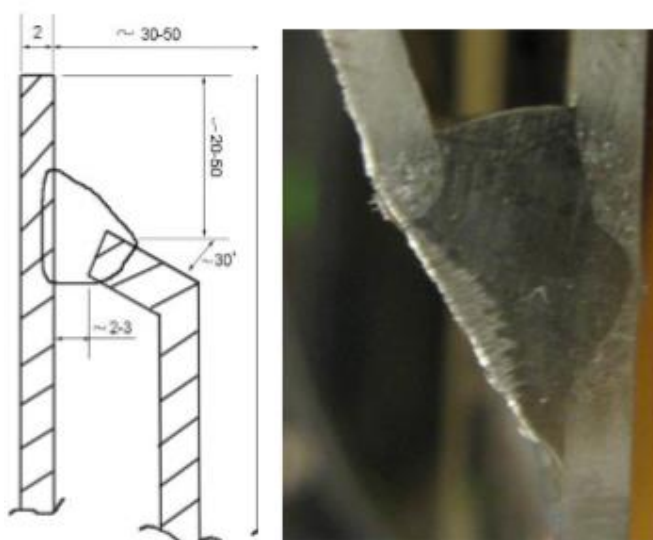
FastROOT® je modificirani postupak MAG zavarivanja kod kojeg se struja zavarivanja i napon kontroliraju digitalno. Temelji se na modificiranom prijenosu metala kratkim spojevima što rezultira niskim unosom topline. Prijenos metala kod FastROOT postupka odvija se tako da se nakon prvog stanja kratkog spoja u kojem dolazi do odvajanja kapljice “pinch” efektom, aktivira drugi strujni interval (sekundarni strujni impuls) koji služi za oblikovanje spoja (zagrijavanje osnovnog materijala) i zagrijavanje vrha dodatnog materijala pripremajući ih za novi ciklus. Nakon toga struja zavarivanja pada na minimalnu vrijednost koja omogućava stabilnost električnog luka i taline do sljedećeg kratkog spoja. Da bi se osigurao ovakav način prijenosa metala koji rezultira minimalnim unosom topline uz izostanak rasprskavanja potrebno je izrazito brzo i precizno upravljanje parametrima zavarivanja u svakom trenutku odvajanja kapljice. [8,12]

Na slici 20. prikazana je dinamička karakteristika FastROOT postupka zavarivanja.



Slika 20. Dinamička karakteristika FastROOT postupka: $1-u=f(t)$; $2-i=f(t)$ [8]

FastROOT postupak najčešće se primjenjuje za zavarivanje korijenskog prolaza iz razloga što je regulacijom parametara sekundarnog strujnog impulsa moguće precizno utjecati na oblik provara. Koristi se još i za zavarivanje tankih limova (nelegirani i visokolegirani čelici, Ni legure) naročito kod većih razmaka. Na slici 21. prikazan je zavareni spoj dupleks i superaustenitnog čelika debljine 2 mm uz razmak veći od 2 mm. [8]

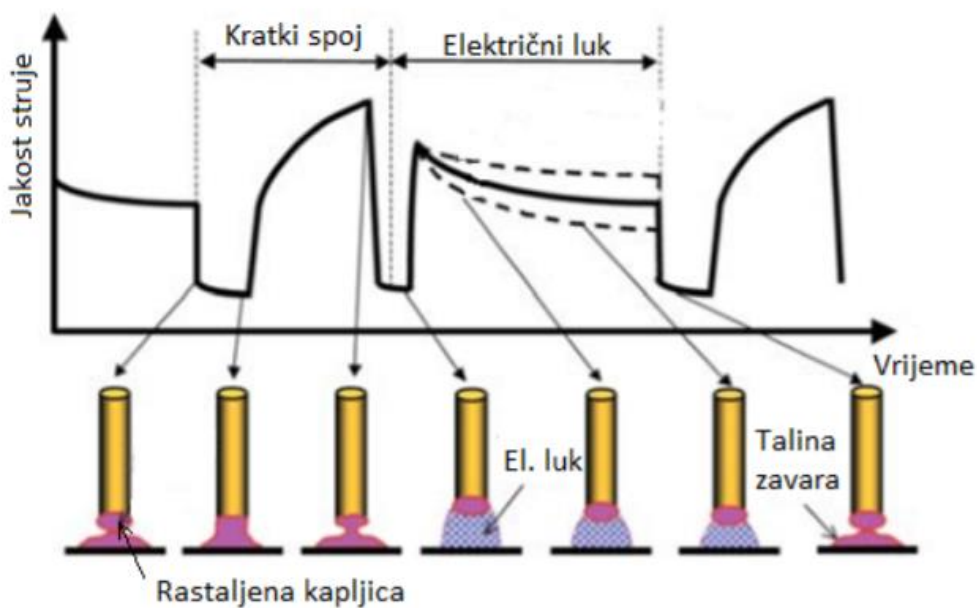


Slika 21. Zavareni spoj dupleks i superaustenitnog čelika debljine 2 mm uz razmak 2 do 3 mm [8]

3.1.4. Controlled bridge transfer®

CBT (eng. Controlled bridge transfer) modificirana je metoda prijenosa metala koja kombinira prednosti impulsnog i klasičnog MAG zavarivanja. Temelji se na preciznom podešavanju jakosti struje u odnosu na napon električnog luka što omogućava stabilizaciju električnog luka i upravljanje prijenosom metala tijekom kratkog spoja. Neposredno prije uspostave električnog luka smanjuje se jakost struje te se rastaljena kapljica prenosi u talinu zavora samo pomoću sila površinske napetosti čime se izbjegava pojava rasprskavanja. Taj kontrolirani proces uz smanjenje unosa topline omogućava zavarivanje korijenskih prolaza s većim razmacima kao i zavarivanje limova debljine manje od promjera dodatnog materijala. [18,19]

Na slici 22. prikazan je princip rada CBT postupka zavarivanja.



Slika 22. Princip rada CBT postupka zavarivanja [18]

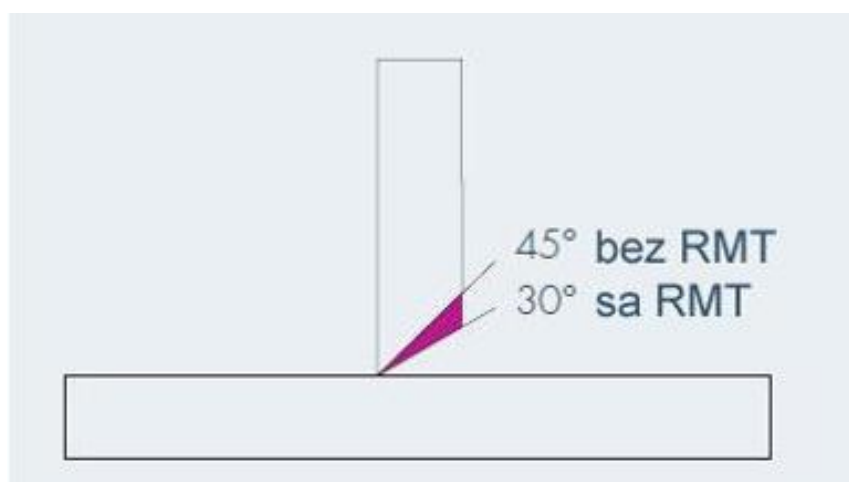
3.2. Modificirani prijenos metala štrcajućim lukom

Zahtjevi za većom kvalitetom zavora, boljom penetracijom i boljom produktivnošću uz veći depozit doveli su do razvoja modifikacija prijenosa metala štrcajućim lukom. Smanjenjem napona zavarivanja skraćuje se električni luk što rezultira koncentriranijim lukom i boljom penetracijom.

Najčešće korišteni modificirani MAG postupci zavarivanja temeljeni na modifikacijama prijenosa metala štrcajućim lukom su: RMT[®], ForceArc[®] i PowerMode[®].

3.2.1. *Rapid MAG Technology*[®]

RMT (eng. Rapid MAG Technology) modificirani je MAG postupak koji se temelji na prijenosu metala štrcajućim lukom. Prijenos metala u električnom luku odvija se u jako sitnim kapljicama pri čemu je frekvencija prijenosa od 2 kHz do 3 kHz. Tako se jezgra električnog luka dodatno sužava te se smanjuju napon i visina električnog luka u odnosu na konvencionalni način prijenosa štrcajućim lukom. Rezultat je intenzivnija penetracija i koncentriraniji električni luk. Zbog navedenih karakteristika RMT postupak pogodan je za zavarivanje debljih materijala. Koristi se i za zavarivanje kutnih zavora gdje bitno utječe na smanjenje broja prolaza što ubrzava postupak zavarivanja. Kod debljih materijala kut pripreme smanjuje se s 45° na 30° (prikazano na slici 23.) dok za debljine do 8 mm nije potrebna priprema. [8,12]



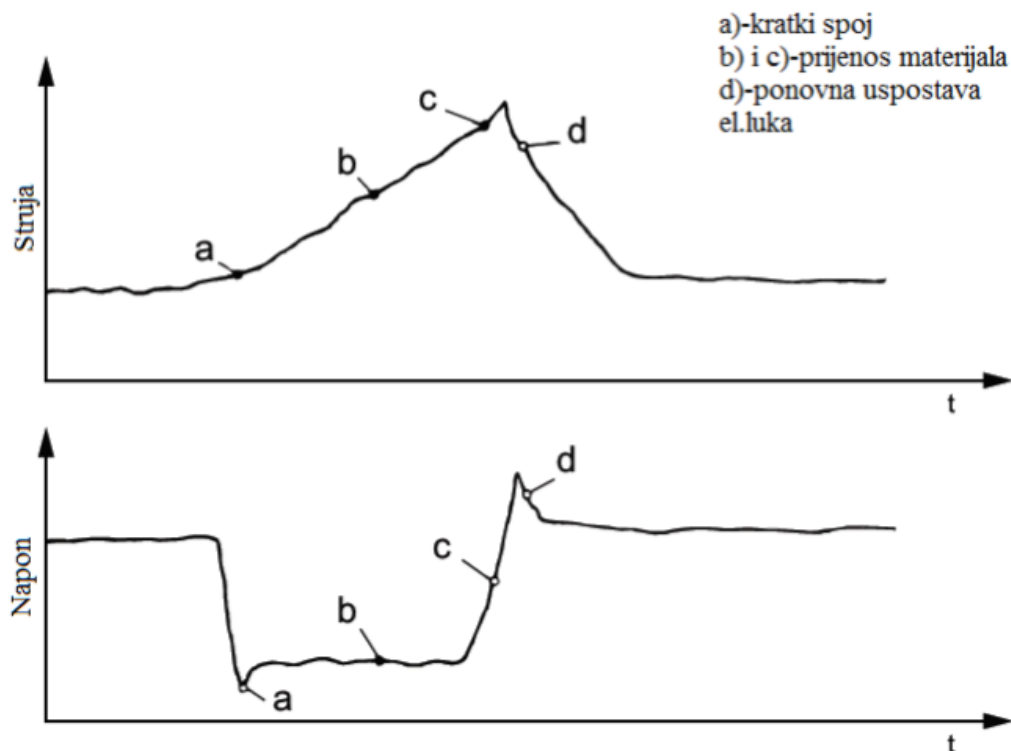
Slika 23. Priprema kutnog spoja kod RMT postupka zavarivanja [12]

3.2.2. *ForceArc*[®]

EWM forceArc modificirani je postupak MAG zavarivanja koji se temelji na prijenosu metala štrcajućim lukom. Kod ForceArc postupka male i srednje velike kapljice taline transferiraju se velikom brzinom kroz električni luk. Zbog njihovog međusobnog doticanja dolazi do povremene pojave kratkih spojeva čime se ostvaruje direktan spoj s talinom i dolazi do pojave rasprskavanja.

Rasprskavanje se reducira zahvaljujući digitalnoj kontroli i korekciji parametara, kojom se, nakon ponovne uspostave električnog luka, vrlo brzo smanjuje struja zavarivanja dok napon ne postigne nominalnu vrijednost. Električni luk je kod ovog postupka kraći u odnosu na konvencionalni MAG postupak zavarivanja. Najčešće se koristi u izgradnji čeličnih konstrukcija, kontejnera i vozila, u energetici, brodogradnji te u izradi offshore konstrukcija. [10,20]

Na slici 24. prikazane su faze EWM forceArc postupka zavarivanja.



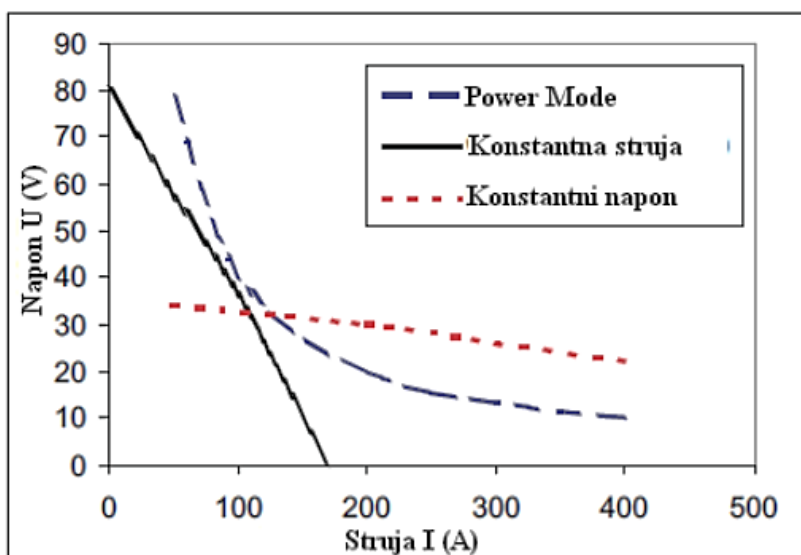
Slika 24. Faze EWM forceArc postupka zavarivanja [10]

Prednosti u odnosu na konvencionalni prijenos metala štrcajućim lukom [10,20]:

- bolje protaljivanje i penetracija
- lakše rukovanje zbog kraćeg električnog luka
- manje ugorina
- veća brzina zavarivanja
- bolja kvaliteta zavora.

3.2.3. PowerMode®

PowerMode® je modificirani postupak MAG zavarivanja koji omogućava stabilan električni luk s jednolikim profilom penetracije. Kontrolom procesa omogućava se zavarivanje materijala debljine i ispod 0,7 mm, a postupak je pogodan za zavarivanje raznih materijala, uključujući aluminij i nehrđajuće čelike. Regulacija električnog luka kod ovog postupka vrši se pomoću snage električne energije (umnožak jakosti i napona struje) dok način prijenosa dodatnog materijala ovisi brzini dodatnog materijala i snazi što se definira u programu. Na višim strujama zavarivanja PowerMode postupak ponaša se prema ravnoj karakteristici struje, dok se pri većim naponima ponaša prema strmopadajućoj karakteristici struje što je prikazano na slici 25. [21,22]



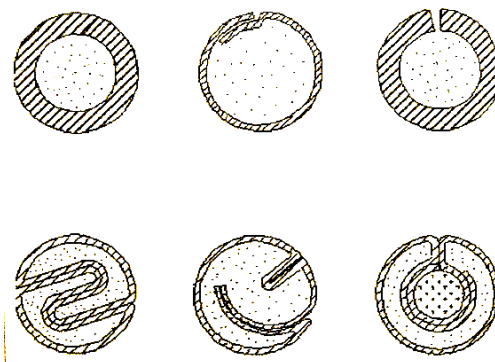
Slika 25. Prikaz karakteristike PowerMode postupka zavarivanja [22]

3.3. Visokoučinski postupci MAG zavarivanja

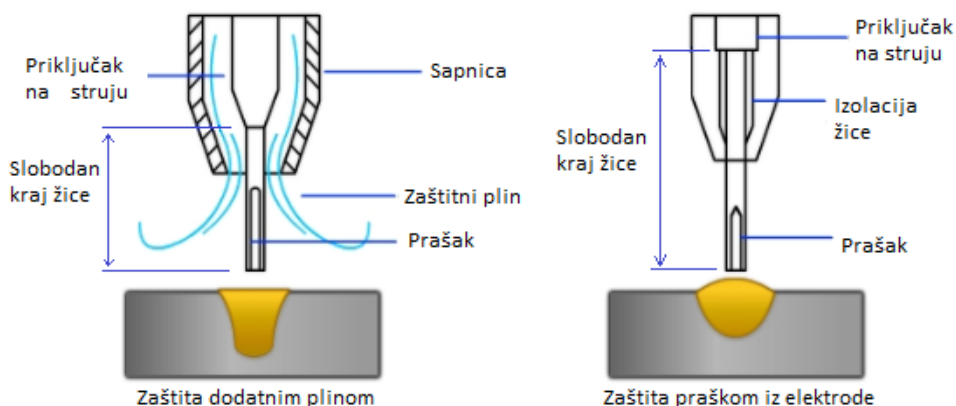
Visokoučinski postupci zavarivanja su oni postupci koji uz ostvarivanje zahtijevane kvalitete i pouzdanosti zavarenog spoja te prihvatljive cijene zavarene konstrukcije povećavaju i produktivnost zavarivanja. Produktivnost zavarivanja karakteriziraju količina depozita, broj i duljina izvedenih zavara i vrijeme potrebno za zavarivanje. Najčešće korištene visokoučinske modifikacije MAG postupka zavarivanja su: FCAW, Tandem postupak, prijenos metala rotirajućim lukom i Buried Arc metoda.

3.3.1. Flux Cored Arc Welding

FCAW (eng. Flux Cored Arc Welding) visokoučinski je postupak MAG zavarivanja kod kojeg se umjesto standardne, pune žice, koriste žice punjene praškom. Neki od mogućih presjeka praškom punjenih žica prikazani su na slici 26. Postupak se odvija u zaštitnoj atmosferi koju je moguće ostvariti na dva načina shematski prikazana na slici 27. Prvi način isti je kao i kod korištenja pune žice, odnosno koristi se dodatni izvor koji zaštitni plin dobavlja do električnog luka. Nedostatak kod ovog načina je stvaranje troske na zavaru što zahtijeva naknadno čišćenje zavarenog spoja. Drugi način je specifičan za ovaj postupak i naziva se još i metoda samozaštite. Ovdje se reakcijom sastojaka iz žice formira zaštitni plin. U odnosu na prvu metodu provarljivost je manja, kao i kvaliteta zavara zbog čega se koristi za zavarivanje manje kritičnih zavara. Kod primjene metode samozaštite potreban je nešto veći razmak između radnih komada. [4,23]



Slika 26. Presjeci praškom punjenih žica [4]



Slika 27. Zaštitna atmosfera kod FCAW postupka zavarivanja [24]

S obzirom da FCAW postupak zavarivanja ne zahtijeva dodatne vještine zavarivača u usporedbi s konvencionalnim MAG postupkom, upotrebljava se u velikom broju industrijskih grana za zavarivanje čelika, nehrđajućih čelika te nekih legura nikla raznih debljina. Priprema spoja prije zavarivanja manje je zahtjevena u odnosu na zavarivanje punom žicom. Kao zaštitni plin u najvećem broju slučajeva koristi se mješavina argona i CO₂. [23]

Najveće prednosti postupka zavarivanja praškom punjenom žicom u odnosu na zavarivanje punom žicom su [23]:

- veća količina depoziranog materijala
- veća produktivnost
- bolja penetracija
- uz primjenu metode samozaštite moguće je zavarivanje i u vjetrovitim uvjetima.

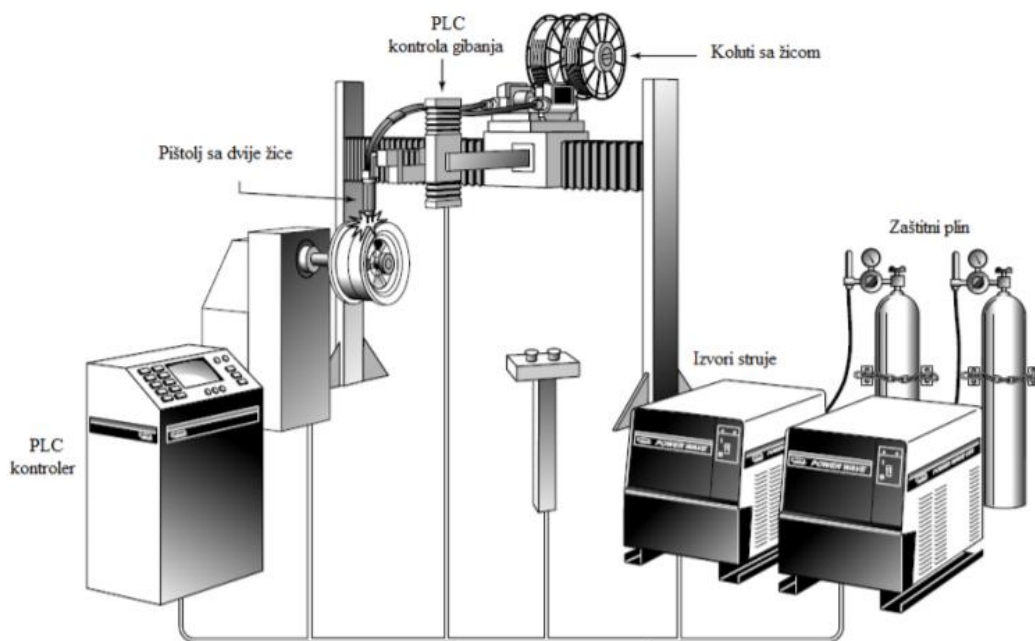
Glavni nedostaci su [23]:

- velike količine plinova razvijenih izgaranjem praška iz žice
- veliko toplinsko zračenje
- neprimjenjiv je za zavarivanje aluminija i njegovih legura.

3.3.2. Tandem Welding

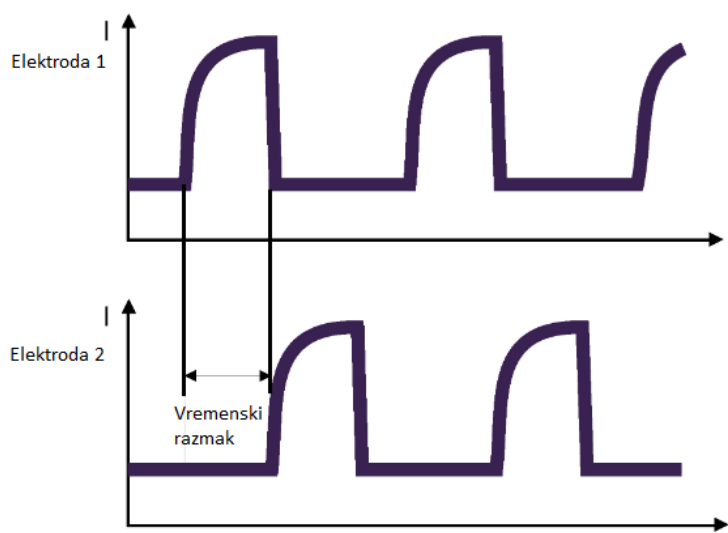
Tandem MAG postupak zavarivanja je modificirani MAG postupak koji za postupak zavarivanja koristi dvije žice koje se kontinuirano tale i ostvaruju zavareni spoj. Svaka od njih ima svoj izvor energije i nisu u fizičkom kontaktu. Prva žica (vodeća) koja je većeg promjera daje određenu dubinu penetracije, dok druga žica (prateća) ispunjava kupku taline, odnosno daje izgled i oblik zavaru. [13,25]

Na slici 28. prikazan je sustav za tandem postupak zavarivanja.



Slika 28. Sustav za tandem postupak zavarivanja [25]

Najčešći način prijenosa metala kod ove metode je prijenos metala impulsnim lukom. Proces se regulira vremenskim razmakom između impulsa na pojedinim elektrodama što je prikazano na slici 29. Upotrebom impulsnog luka na vodećoj elektrodi kontrolira se unos topline što omogućuje primjenu metode na relativno tankim materijalima i zavarivanje u različitim položajima. [13]



Slika 29. Graf jakosti struje za pojedine elektrode kod tandem postupka [25]

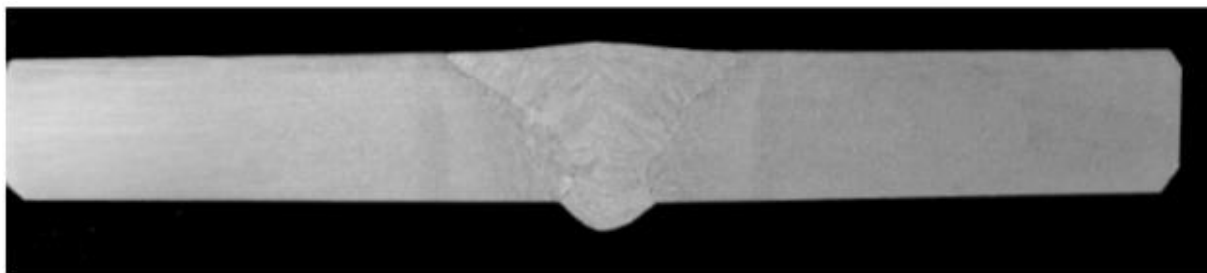
Pištolji za tandem zavarivanje imaju raznih izvedbi, ovisno o razmaku žica, kutova između žica ili slobodnog kraja žica. Razmak između žica može biti fiksno podešen, dok postoje i pištolji s mogućnošću podešavanja razmaka. Razmak između žica ima veliki utjecaj na geometriju i izgled zavara. Primjer pištolja za tandem zavarivanje prikazan je na slici 30. [25]



Slika 30. Pištolj za tandem postupak zavarivanja [13]

Zbog potrebe za preciznim vođenjem pištolja tandem postupak najčešće se koristi kao automatizirani ili robotizirani. Najveću upotrebu postupak je pronašao u automobilske industriji, brodogradnji i željezničkoj industriji gdje se koristi za zavarivanje čelika, nehrđajućih čelika te aluminija i njegovih legura. [26]

Na slici 31. prikazan je zavareni spoj čelika S690Q debljine 6 mm zavaren tandem MAG postupkom zavarivanja. U tablici 1. navedeni su parametri zavarivanja (v_z – brzina dodavanja žice, v_z – brzina zavarivanja).



Slika 31. Zavareni spoj čelika S690Q debljine 6 mm - tandem postupak zavarivanja [13]

Tablica 1. Parametri korišteni tijekom zavarivanja čelika S690Q [13]

Žica	I , A	U , V	v_z , m/min	v_z , cm/min
1 – vodeća	167	25,8	6,1	50
2 – prateća	165	25,8	6,0	

Prednosti tandem MAG postupka zavarivanja u odnosu na konvencionalno MAG zavarivanje su:

- veća količina deponiranog materijala
- veća brzina zavarivanja
- manja razina rasprskavanja
- manji unos topline u zavareni spoj
- veća penetracija
- bolja kontrola taline preciznom regulacijom većeg broja parametara.

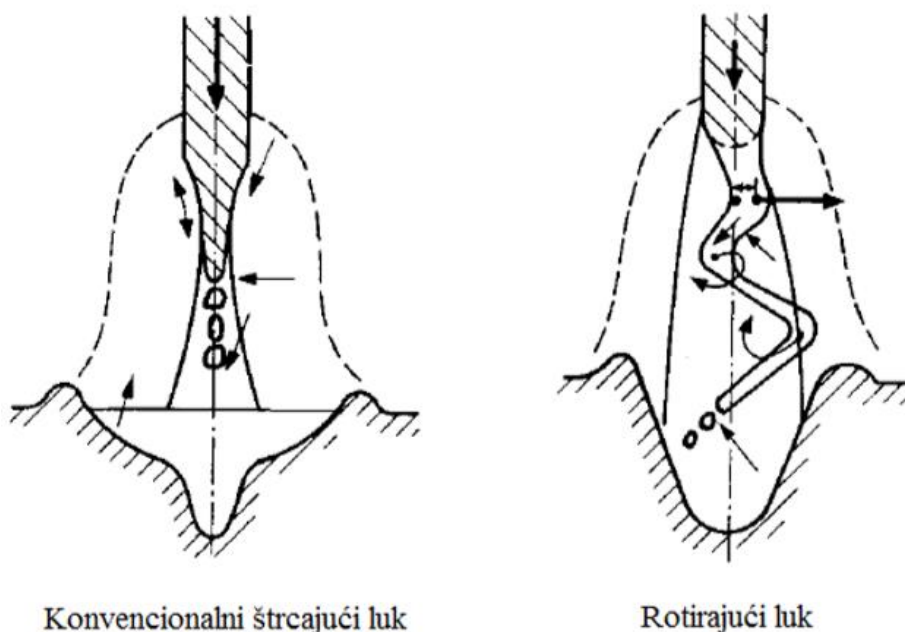
Glavni nedostaci su:

- zbog potrebe za preciznim vođenjem pištolja potrebna je automatizacija ili robotizacija procesa
- potrebna su dva izvora struje
- potreban je poseban pištolj za zavarivanje
- cijena.

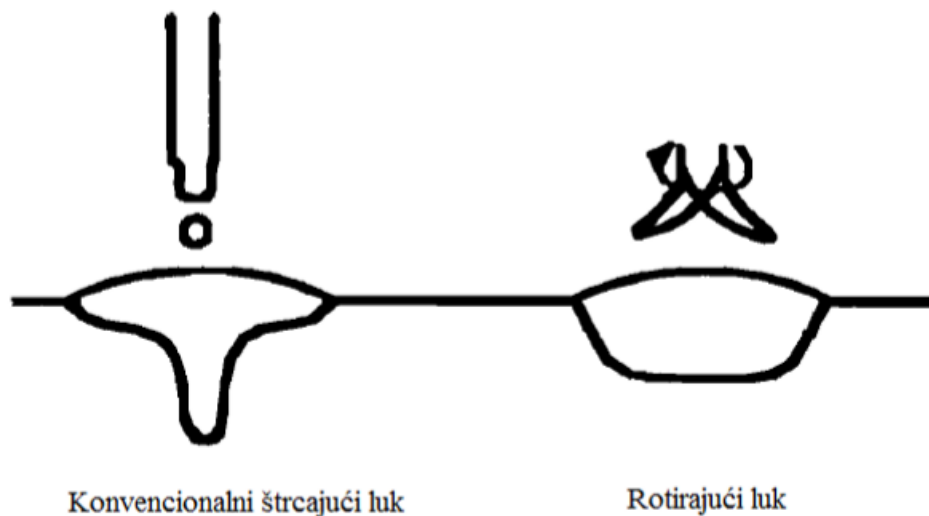
3.3.3. Rotirajući luk

Rotirajući luk je način prijenosa metala u električnom luku kod kojeg se rastaljeni kraj žice rotacijski prenosi do taline. Vrh žice se tali zbog velikog slobodnog kraja žice (25 mm do 35 mm) i velike struje zavarivanja. Pad struje zavarivanja prilikom povećanja slobodnog kraja žice sprječava se povećanjem brzine dodavanja žice. Tako struja ostaje konstantna i održava se jednolika penetracija. Kod prijenosa metala rotirajućim lukom koriste se plinske mješavine argona i kisika iz razloga što one bitno utječu na smanjenje površinske napetosti taline i omogućavaju izravan prijelaz iz stabilnog konvencionalnog štrcajućeg luka u rotirajući luk. Rastaljeni metal stvara se u obliku gusjenice nakon čega se odvajaju sitne kapljice. Uslijed djelovanja radijalne komponente magnetskog polja u električnom luku, rastaljena gusjenica pomiče se iz simetrane i počinje rotirati. Električni luk se zbog toga konusno proširuje, a rastaljeni metal u sitnim kapljicama ulazi u talinu zavora. Zavari su plosnati i široki. [10,27]

Na slici 32. prikazan je usporedni shematski prikaz prijenosa metala konvencionalnim štrcajućim lukom i rotirajućim lukom, dok je na slici 33. usporedni prikaz profila zavora dobivenih navedenim prijenosima metala u električnom luku.



Slika 32. Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim i rotirajućim lukom [10]



Slika 33. Usporedba izgleda profila zavora kod štrcajućeg i rotirajućeg luka [10]

Visokoučinsko MAG zavarivanje rotirajućim lukom postiže se samo punim žicama promjera 1,0 mm i 1,2 mm. Žice manjih promjera nestabilne su pri velikim brzinama, a kod žica većih promjera teško je ostvariti potrebno zagrijavanje slobodnog kraja žice. Postupak se upotrebljava za zavarivanje materijala srednjih i velikih debljina u proizvodnji i izradi čeličnih konstrukcija u strojogradnji i kotlogradnji. Dobro protaljeni rubovi čine rotacijski prijenos metala pogodnim za primjenu za zavarivanje dinamički opterećenih spojeva. [10,27]

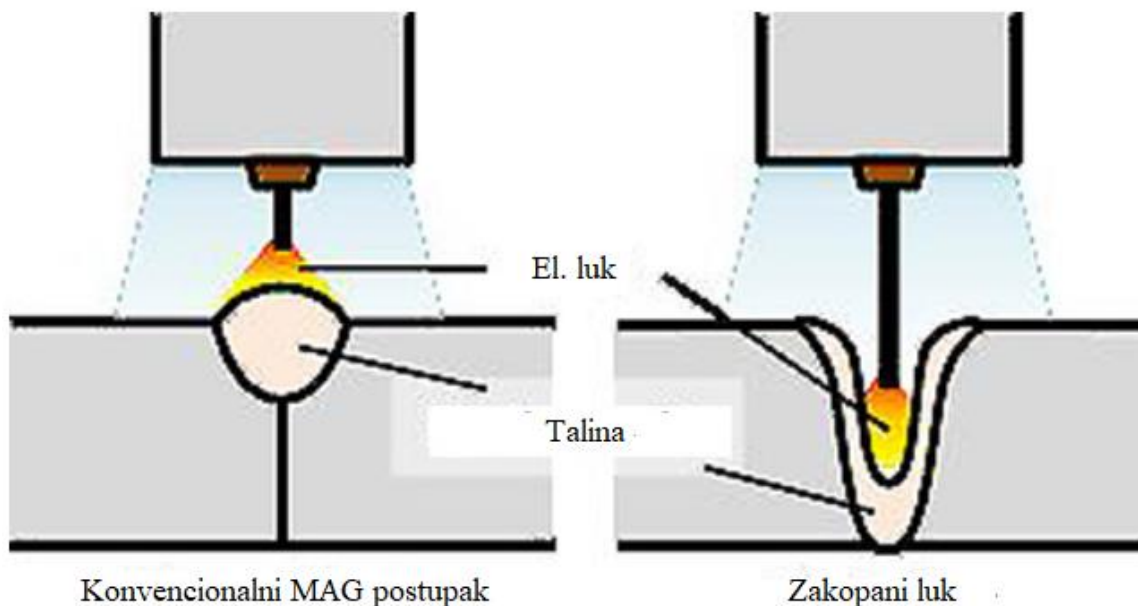
Prednosti u odnosu na konvencionalno MAG zavarivanje:

- veća količina nataljenog metala
- veća brzina zavarivanja.

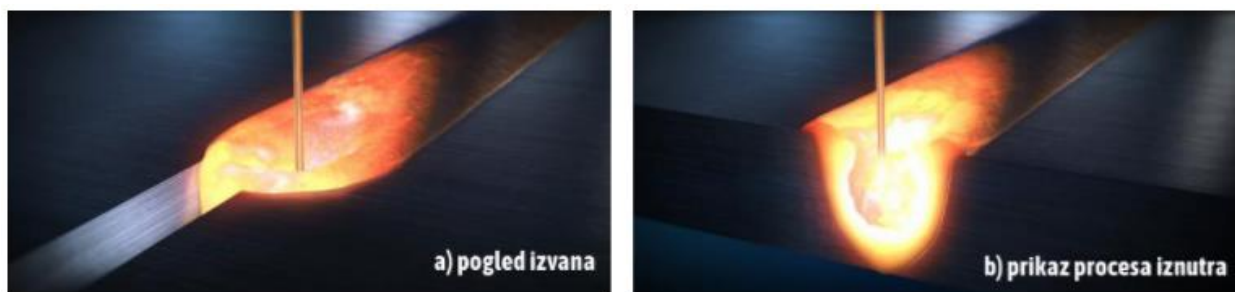
Glavni nedostak je ograničenje kod izbora promjera dodatnog materijala.

3.3.4. Zakopani luk – „D-Arc“

Zakopani električni luk (eng. Buried arc) način je prijenosa metala kod kojeg je električni luk, zajedno s vrhom rastaljene žice, postavljen ispod razine površine rastaljenog metala zavora kao što je prikazano na slikama 34. i 35. [28]



Slika 34. Shematski prikaz konvencionalnog MAG postupka i zakopanog luka [28]

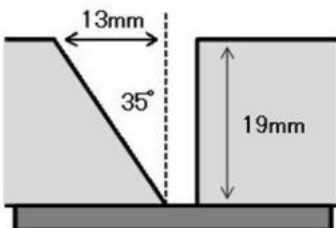
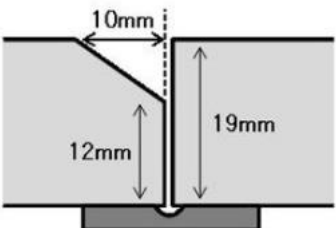
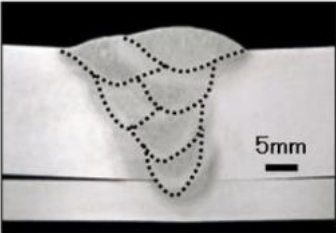
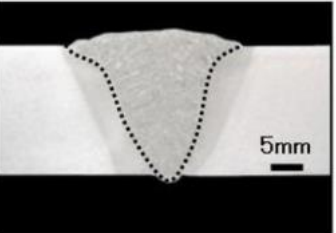


Slika 35. Prikaz zakopanog luka [28]

Iz razloga što je izvor topline postavljen dublje u odnosu na konvencionalni električni luk, kod zakopanog luka postiže se veća penetracija što ga čini prikladnim za zavarivanje debljih materijala. Tako je ovim postupkom moguće zamijeniti neke od postupaka koji se koriste za zavarivanje debljih materijala, a imaju određena ograničenja (položaj i smjer zavarivanja, priprema) kao što su zavarivanje plazmom, laserom ili hibridni postupci zavarivanja. Konvencionalni MAG postupak zavarivanja nije dovoljno učinkovit za zavarivanje debljih materijala zbog potrebne velike količine dodatnog materijala uz zavarivanje u više prolaza što dovodi do velikih deformacija radnog komada. Svi navedeni nedostaci također se mogu eliminirati primjenom zakopanog luka. Razlog zbog kojeg se zakopani luk rijetko upotrebljavao u proizvodnji je njegova podložnost nestabilnom ponašanju i

povremenoj pojavi kratkih spojeva, odnosno vrlo zahtjevna stabilizacija procesa naročito u području jakih struja. Brojnim istraživanjima na području tehnike stabilizacije zakopanog luka razvijen je visokoučinkoviti robotizirani sustav nazvan „D-Arc“. Uz robot, sustav čine dva izvora struje za zavarivanje koji mogu isporučiti struju do 1000 A. Ovim sustavom moguće je održavati stabilan proces pri jakim strujama. Koristi ga se uz zaštitni plin 100 % CO₂ uz primjenu pune žice te omogućuje zavarivanje nelegiranih čelika debljine do 20 mm u jednom prolazu [28].

Na slici 36. prikazana je usporedba parametara, potrebne pripreme i poprečnog presjeka dva zavarena spoja čelika debljine 19 mm. Kod prvog zvara korišten je konvencionalni MAG postupak zavarivanja, dok je kod drugog zvara korišten zakopani luk. Vidljiva je bitna razlika u zahtjevima pripreme zvara, potrebnom broju prolaza, potrebnoj količini dodatnog materijala i deformaciji radnog komada.

	Konvencionalno MAG zavarivanje	D - Arc
	Struja zavarivanja : 300A Napon luka : 30V Brzina zavarivanja : 30cm/min Promjer žice : ϕ 1.4mm Zašt. plin : CO ₂ (30L/min)	Struja zavarivanja : 620A Napon luka : 44V Brzina zavarivanja : 30cm/min Promjer žice : ϕ 1.4mm Zašt. plin : CO ₂ (30L/min)
Priprema	 Razmak 4 mm, čelična podloška	 Razmak 1 mm, bakrena podloška
Poprečni presjek zvara		
Broj prolaza	6	1
Površina otvora	123.5 mm ²	38.5 mm ²
Kutna deformacija	7°	1°

Slika 36. Usporedba presjeka zvara zavarenih konvencionalnom i „D-Arc“ tehnologijom [28]

Prednosti „D-Arc“ tehnologije u odnosu na konvencionalni MAG postupak [28]:

- veća penetracija
- veća količina nataljenog metala
- veća produktivnost
- manje deformacija uslijed manjeg broja prolaza.

Nedostaci [28]:

- zahtjevnija stabilizacija procesa
- cijena.

4. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada provedena je analiza dva zavarena spoja materijala kvalitete S355 J2+N debljine 20 mm. Tehnologija zavarivanja, rezultati ispitivanja i fotografije za oba uzorka preuzeti su iz literature [29] i [30] koja je dobivena na Katedri za zavarene konstrukcije. Prvi zavareni spoj izveden je konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja uz prijenos metala štrcajućim lukom (uzorak „A“), dok je drugi zavareni spoj izveden modificiranim MAG postupkom zavarivanja uz primjenu zakopanog luka (uzorak „B“). Oba spoja zavarena su u položenom položaju. Na zavarenim uzorcima provedena su nerazorna i razorna ispitivanja. Usporedbom dobivenih rezultata i detaljnom ekonomskom analizom doneseni su zaključci o prikladnosti upotrebe modificiranog MAG postupka zavarivanja uz primjenu zakopanog luka kao zamjene za konvencionalni MAG postupak.

4.1. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal korišten je čelik oznake S355 J2+N (prema normi *HRN EN 10027-1:2007-Sustavi označivanja za čelike-1. dio: Nazivi čelika*) debljine 20 mm. Oznaka S355 J2+N prema navedenoj normi označava:

- S - konstrukcijski čelik
- 355 – minimalna granica razvlačenja R_e pri debljinama do 16 mm iznosi 355 MPa
- J2 – pri ispitivanju udarnog rada loma (ispitni uzorak s V zarezom) postiže vrijednost od minimalno 27 J pri temperaturi od -20 °C
- N – isporučen u normaliziranom stanju.

Prema istoj normi čelik postiže vrijednosti vlačne čvrstoće R_m između 470 MPa i 630 MPa.

Prema normi *HRI TR ISO 15608* ovaj materijal spada u grupu 1, podgrupu 1.2 (referentni standard: *EN 10025-2*).

U tablicama 2. i 3. prikazani su kemijski sastav i mehanička svojstva osnovnog materijala.

Tablica 2. Kemijski sastav čelika S355 J2+N izražen u postocima [29]

C	Si	Mn	P	S	N	Cu
0,17	0,24	1,25	0,016	0,006	0,008	0,23
Cr	Ni	Mo	Al	V	Ti	Nb
0,06	0,1	0,11	0,032	0,005	0,025	0,033

Tablica 3. Mehanička svojstva čelika S355 J2+N [29]

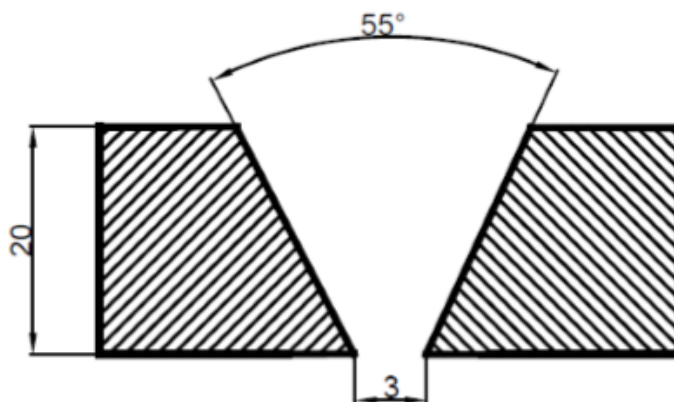
$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	A_5 , %	T , °C
429	580	21	-20

4.2. Zavarivanje konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja – uzorak „A“

Prvi zavareni spoj izveden je robotiziranim MAG postupkom zavarivanja. Nakon pripreme i oblikovanja spoja te odabira dodatnog materijala i zaštitnog plina spoj je zavaren u 12 prolaza.

4.2.1. Oblikovanje zavarenog spoja

Toplinskim rezanjem i brušenjem oblikovana je V priprema spoja s kutem otvora od 55°. Razmak između radnih komada bio je tri milimetra. Na slici 37. prikazana je priprema zavarenog spoja.

**Slika 37. Priprema spoja – uzorak „A“ [30]**

4.2.2. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal korištena je puna žica oznake G 46 4 M21 4Si1 (prema normi *HRN EN ISO 14341:2012 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode i depoziti za elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštiti plina za nelegirane i sitnozrnate čelike: Razredba*) i trgovačkog imena Castomag 45203 – SG3. Promjer dodatnog materijala bio je 1,2 mm.

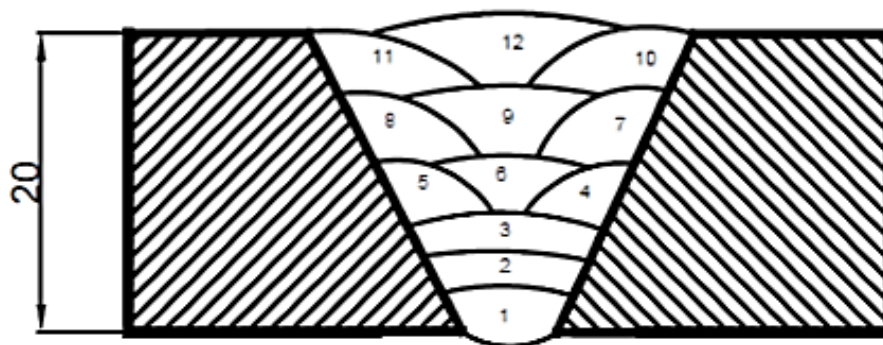
4.2.3. Zaštitni plin

Kao zaštitni plin korištena je plinska mješavina oznake M24 (prema normi *HRN EN ISO 14175:2008 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje-plinovi i plinske mješavine za zavarivanje i srodne postupke*) i trgovačkog imena Ferroline C6X1 koja se sastoji od 93 % Ar, 6 % CO₂ i 1 % O₂. Protok zaštitnog plina pri zavarivanju bio je 15 l/min.

4.2.4. Pojediniosti postupka zavarivanja

Temperatura predgijavanja bila je 20 °C, dok je za međuslojnu temperaturu određen raspon između 120 °C i 150 °C. Udaljenost kontaktne sapnice od radnog komada bila je 15 mm. Spoj je zavaren neutralnom tehnikom. Korijenski prolaz i prva popuna zavareni su uz prijenos metala kratkim spojevima, dok su ostali prolazi zavareni uz prijenos metala štrcajućim lukom.

Na slici 38. prikazan je redoslijed zavarivanja.



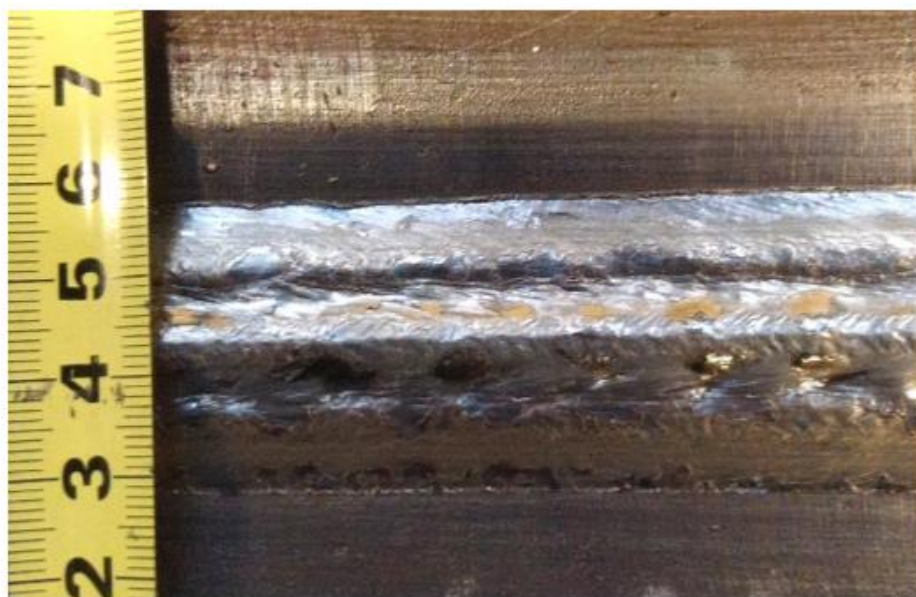
Slika 38. Redoslijed zavarivanja [30]

U tablici 4. prikazani su parametri zavarivanja.

Tablica 4. Parametri zavarivanja uzorka „A“ [30]

Prolaz	Postupak	Promjer žice, mm	Struja, A	Napon, V	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice, m/min	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ/cm
1	135-D	1,2	110	17,5	DC, +	2,7	10,0	9,24
2	135-D	1,2	160	21,0	DC, +	3,0	11,0	14,7
3-12	135-S	1,2	300	29,0	DC, +	8,6	30,0	14,0

Opisanom tehnologijom zavarivanja dobiven je zavareni spoj prikazan na slici 39.



Slika 39. Izgled lica zavara – uzork „A“ [30]

Makroizbrusak uzorka „A“ prikazan je na slici 40.



Slika 40. Makroizbrusak uzorka „A“ [30]

4.2.5. Rezultati mjerenja tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće provedeno je metodom HV10 (mjerenje tvrdoće po Vickersu prilikom kojeg se u uzorak utiskuje četverostrana dijamantna piramida silom od $F = 10 \cdot 9,81 = 98,1 \text{ N}$ u trajanju između 10 s i 15 s). Mjesta mjerenja tvrdoće bila su u nizu na udaljenosti od dva milimetra od gornjeg i donjeg ruba uzorka što je prikazano na slici 41. U nizu su učinjena po tri mjerenja u osnovnom metalu, zonama utjecaja topline i metalu zavara. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 5.



Slika 41. Mjerenje tvrdoće uzorka „A“ [30]

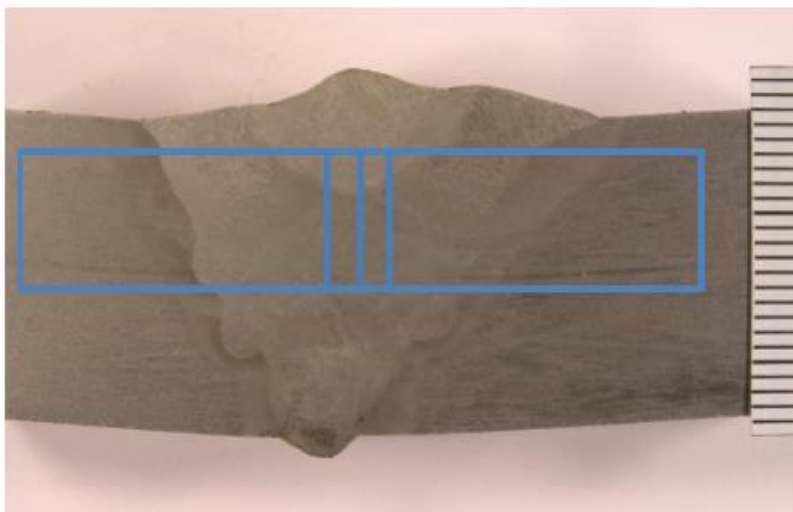
Tablica 5. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka „A“ [30]

Niz	Osnovni metal	Zona utjecaja topline	Metal zavara	Zona utjecaja topline	Osnovni metal
1	167	182	194	219	162
	163	198	221	205	157
	164	224	197	180	152
2	160	176	193	193	170
	163	181	206	182	176
	169	193	201	178	167

Prema normi *HRN EN ISO 15614-1* maksimalna dozvoljena vrijednost tvrdoće za grupu materijala 1.2 iznosi 380 HV10. Provjerom dobivenih rezultata mjerenja tvrdoće zaključuje se da ne prelaze maksimalanu dozvoljenu vrijednost te da nije izazvano stvaranje martenzitne strukture u zoni utjecaja topline što korištenoj tehnologiji zavarivanja daje zadovoljavajuću ocjenu.

4.2.6. Rezultati mjerenja udarnog rada loma

Mehaničkom strojnom obradom izrađena su tri uzorka za ispitivanje udarnog rada loma. Položaj ispitne epruvete i V-utora prikazan je na slici 42. Dimenzije epruveta su 10x10x55 mm. Ispitivanje je provedeno pri ispitnoj temperaturi od -20 °C. Rezultati ispitivanja dani su u tablici 6.

**Slika 42. Položaj epruvete i zareza za ispitivanje udarnog rada loma - uzorak „A“ [30]**

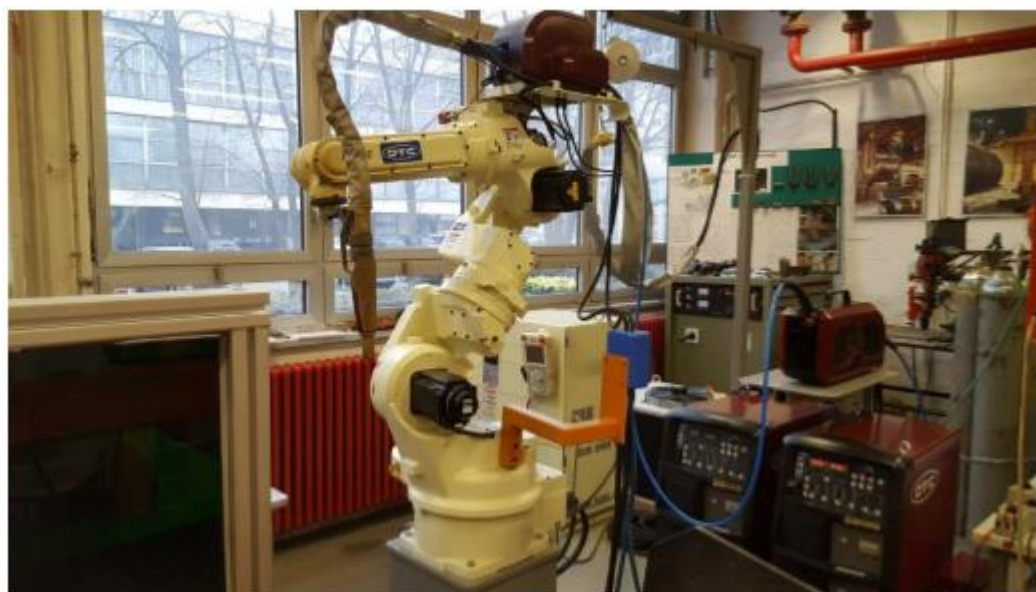
Tablica 6. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma – uzorak „A“ [30]

Epruveta broj:	Presjek S_0 , cm ²	Udarni rad loma KV, J	Prosjeck
1	0,8	175	169 J
2	0,8	171	
3	0,8	161	

Prema normi *HRN EN ISO 148-1:2012* zahtjevana vrijednost udarnog rada loma za materijale grupe 1,2 iznosi 27 J. Provjerom dobivenih rezultata zaključuje se da postupak zadovoljava zahtjeve iz norme.

4.3. Zavarivanje modificiranim MAG postupkom koji primjenjuje zakopani luk – uzorak „B“

Drugi zavareni spoj izveden je modificiranim MAG postupkom zavarivanja uz primjenu zakopanog luka. Zavarivanje je izvedeno na robotiziranom sustavu imena „D-Arc“ čiji su sastavni dijelovi (robot OTC FD-V20S i dva izvora struje za zavarivanje M500D) prikazani na slikama 43. i 44. Nakon pripreme i oblikovanja spoja te odabira dodatnog materijala i zaštitnog plina spoj je zavaren u jednom prolazu. [29]

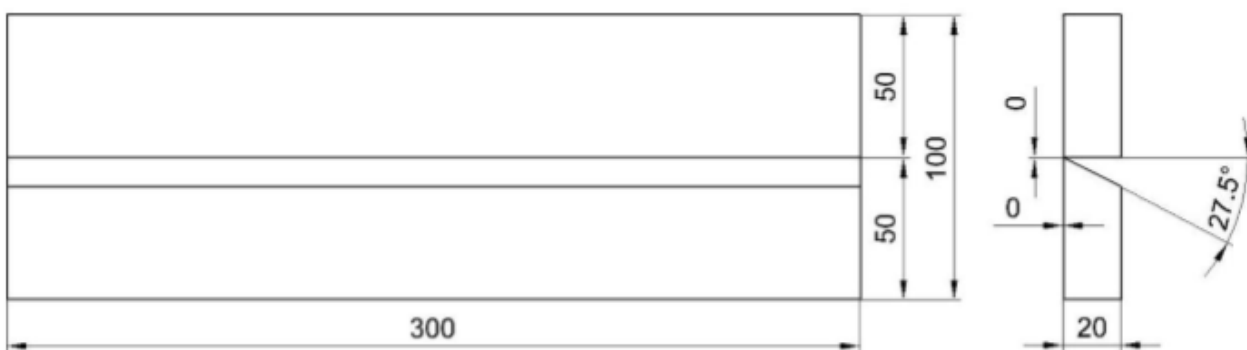
**Slika 43. Robot za zavarivanje OTC FD-V20S [29]**



Slika 44. Izvori struje za zavarivanje M500D [29]

4.3.1. Oblikovanje zavarenog spoja

Toplinskim rezanjem i brušenjem oblikovana je $\frac{1}{2}$ -V priprema spoja. Kut otvora bio je $27,5^\circ$ bez razmaka između radnih komada. Priprema drugog zavarenog spoja prikazana je na slici 45. [29]



Slika 45. Priprema drugog zavarenog spoja [29]

4.3.2. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal korištena je puna žica oznake G 42 5M/C G3Si1 (prema normi *HRN EN ISO 14341:2012 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode i depoziti za elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštiti plina za nelegirane i sitnozrnate čelike: Razredba*) i trgovačkog imena VAC 60. Promjer korištene žice bio je 1,6 mm. [29]

4.3.3. Zaštitni plin

Kao zaštitni plin korišten je 100 % CO₂. Protok zaštitnog plina bio je 15 l/min.

4.3.4. Pojediniosti postupka zavarivanja

Nakon pripreme i izbora dodatnog materijala i zaštitnog plina zavaren je spoj u jednom prolazu koristeći parametre zavarivanja koji su prikazani u tablici 7. Spoj je zavaren neutralnom tehnikom rada.

Tablica 7. Parametri zavarivanja [29]

Struja, A	Napon, V	Brzina dodavanja žice, m/min	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ/cm
500	39,5	11,4	27	35,1

Ovaj proces je relativno nov te je još potrebno istraživati njegovu efikasnost. Iz tog razloga unos topline ovdje je izračunat uz pretpostavku da je efikasnost procesa jednaka onoj kod konvencionalnog MAG postupka ($\eta = 0,8$). Pretpostavka je da je efikasnost ipak nešto veća čime se povećava i unos topline.

Fotografija zavarenog spoja neposredno nakon procesa zavarivanja prikazana je na slici 46.



Slika 46. Fotografija uzorka „B“ neposredno nakon zavarivanja [29]

Na slici 47. prikazan je makroizbrusak uzorka „B“.

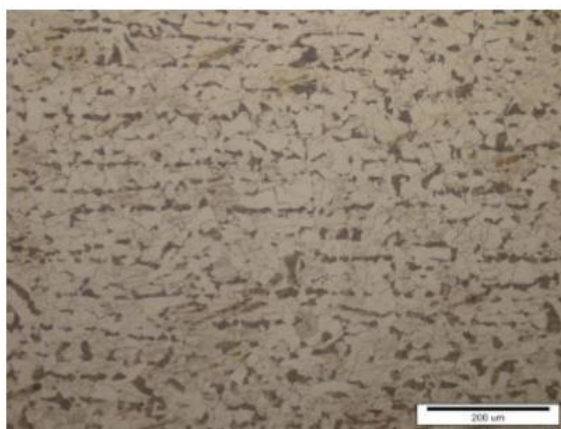


Slika 47. Makroizbrusak uzorka „B“ [29]

4.3.5. Analiza mikrostrukture

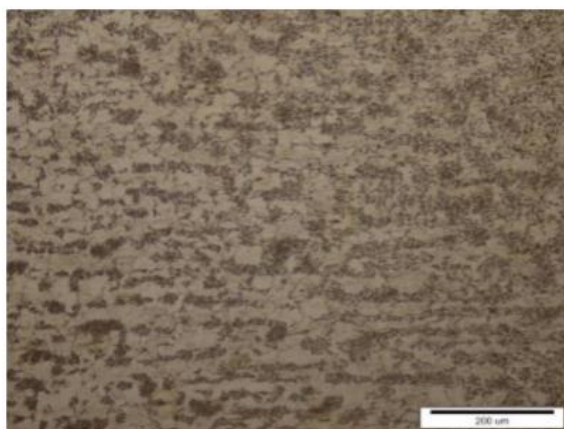
Analiza mikrostrukture uzorka „B“ provedena je svjetlosnim mikroskopom na nekoliko područja materijala (osnovni materijal, nekoliko područja zona utjecaja topline i metal zavora).

Na slici 48. prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala. Mikrostruktura je feritno-perlitna s prosječnom veličinom kristalnih zrna od otprilike 35 μm .



Slika 48. Mikrostruktura osnovnog materijala [29]

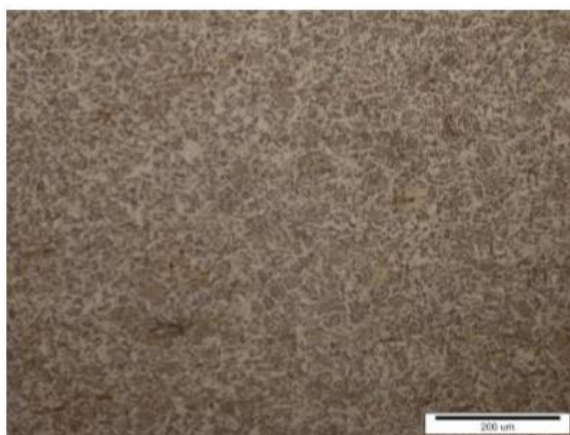
Na slici 49. prikazana je mikrostruktura u zoni utjecaja topline uz granicu s osnovnim materijalom. Dio kristalnih zrna ostao je neporomijenjene mikrostrukture, dok se drugi dio (desna strana slike) uslijed zagrijavanja između A_{C1} i A_{C3} temperatura transformirao u austenit te potom u bainit tijekom hlađenja. Veličina kristalnih zrna nije se znatno mijenjala.



Slika 49. Mikrostruktura ZUT-1 [29]

Na slici 50. prikazana je mikrostruktura u zoni utjecaja topline na području koje je tijekom postupka zavarivanja zagrijano u rasponu između 50 $^{\circ}\text{C}$ i 100 $^{\circ}\text{C}$ iznad A_{C3} temperature. Mikrostruktura se

uslijed zagrijavanja promijenila u austenit koji se tijekom hlađenja transformirao u bainit i ferit. Prosječna veličina zrna u ovom području iznosi 20 μm .



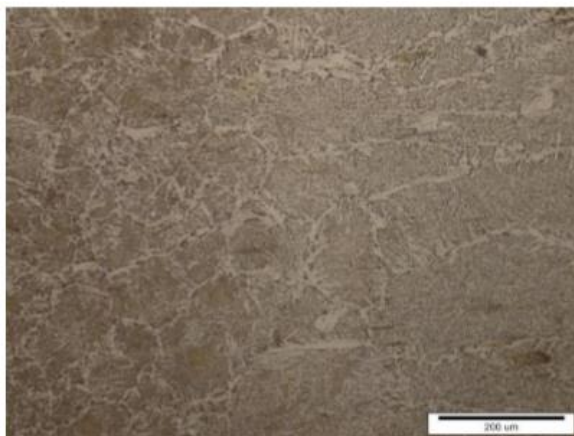
Slika 50. Mikrostruktura ZUT-2 [29]

Na slici 51. prikazana je mikrostruktura u zoni utjecaja topline na području koje je tijekom zavarivanja zagrijano na temperature iznad 1100 °C, ali nije rastaljeno. Mikrostruktura se zagrijavanjem mijenja u austenitnu. Kristalna zrna počinju rasti uslijed visoke temperature. Tijekom hlađenja formira se gruba bainitno-feritna mikrostruktura. Prosječna veličina zrna u ovom području je 120 μm .



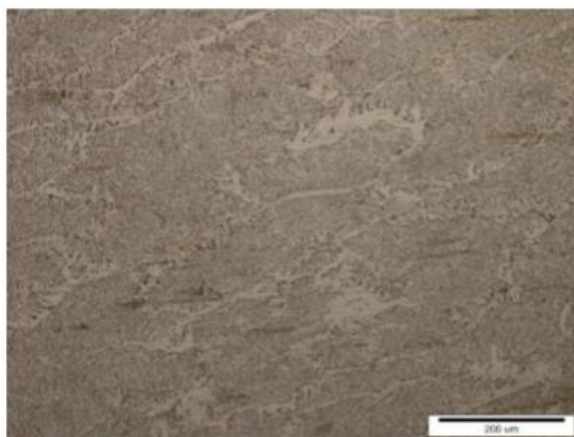
Slika 51. Mikrostruktura ZUT-3 [29]

Na slici 52. prikazana je mikrostruktura granice između zone utjecaja topline i metala zavora. S lijeve strane slike vidljiva je mikrostruktura područja zone utjecaja topline dok je s desne strane slike prikazana mikrostruktura metala zavora.



Slika 52. Mikrostruktura na granici zavora [29]

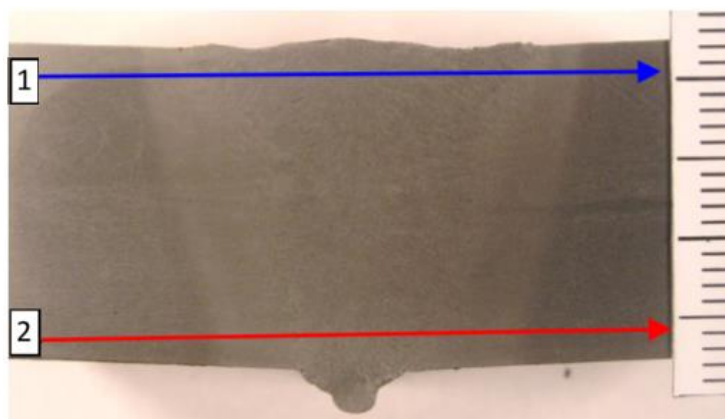
Na slici 53. prikazana je mikrostruktura metala zavora.



Slika 53. Mikrostruktura metala zavora [29]

4.3.6. Rezultati mjerenja tvrdoće

Kao i kod prvog uzorka, ispitivanje tvrdoće provedeno je metodom HV10. Mjesta mjerenja tvrdoće bila su u nizu na udaljenosti od dva milimetra od gornjeg i donjeg ruba uzorka što je prikazano na slici 54. Kod ovog uzorka izvedeno je samo jedno mjerenje u nizu i to na osnovnom metalu, zonama utjecaja topline i metalu zavora. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 8.



Slika 54. Mjerenje tvrdoće uzorka „B“ [29]

Tablica 8. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka „B“ [29]

Niz	Osnovni metal	Zona utjecaja topline	Metal zavora	Zona utjecaja topline	Osnovni metal
1	178	203	234	199	168
2	170	209	222	195	182

Kao i kod uzorka „A“ provjerom dobivenih rezultata mjerenja tvrdoće zaključuje se da oni ne prelaze maksimalanu dozvoljenu vrijednost te da nije izazvano stvaranje martenzitne strukture (što je vidljivo i u analizi mikrostrukture) u zoni utjecaja topline što korištenoj tehnologiji zavarivanja daje zadovoljavajuću ocjenu.

4.3.7. Rezultati mjerenja udarnog rada loma

Mjerenje udarnog rada loma provedeno je na nekoliko strojno izrađenih uzoraka s različitih područja zavarenog spoja (metal zavora, granica zavora i tri područja u zoni utjecaja topline). Ispitivanja su provedena za temperature od +20 °C i -20 °C. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 9. (x označava udaljenost područja ispitivanja od središta zavora u milimetrima, a *T* označava temperaturu ispitivanja)

Tablica 9. Rezultati mjerenja udarnog rada loma - uzorak „B“ [29]

Područje:	x, mm	T, °C	Udarni rad loma KV, J
Metal zavara	0	+20	103,1
Granica zavara	12	+20	82,1
ZUT-1	13	+20	112,7
ZUT-2	14	+20	124,5
ZUT-3	15	+20	127,9
Metal zavara	0	-20	31,9
Granica zavara	12	-20	36,5
ZUT-1	13	-20	60,7
ZUT-2	14	-20	77,9
ZUT-3	15	-20	77,2

Iako su rezultati mjerenja udarnog rada loma uzorka „B“ pri temperaturi od -20 °C lošiji od onih dobivenih pri temperaturi od +20 °C, kao i od rezultata mjerenja udarnog rada loma uzorka „A“ ipak zadovoljavaju minimalnu zahtjevanu vrijednost prema normi koja iznosi 27 J. Stoga se zaključuje da postupak zadovoljava zahtjeve iz norme te je prihvatljiv kao zamjena za konvencionalni MAG postupak iz pogleda ispitivanja udarnog rada loma.

4.4. Utjecaj pripreme spoja na kvalitetu zavara kod „D-Arc“ sustava

Na makroizbrusku uzorka „B“, koji je imao ½-V pripremu spoja, primjetno je da nema nikakvih vidljivih nepravilnosti unutar zavara. U svrhu provjere utjecaja oblika pripreme spoja na kvalitetu zavara provedeno je nerazorno ispitivanje radiografskom metodom na zavarenom spoju čelika S355 J2+N debljine 20 mm koji je imao I pripremu spoja (uzorak „C“). Parametri zavarivanja ovog uzorka jednaki su kao i kod zavarivanja uzorka „B“ i prikazani su u tablici 10.

Tablica 10. Parametri zavarivanja uzorka „C“

Struja, A	Napon, V	Brzina dodavanja žice, m/min	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ/cm
500	39,5	11,4	27	35,1

Ispitivanje je provedeno na RTG uređaju „Balteau 300 D“ na Katedri za nerazorna ispitivanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu. Korištena je slikovna ploča „Kodak industrex flex HR“. Parametri snimanja prikazani su u tablici 11.

Tablica 11. Parametri snimanja uzorka „C“

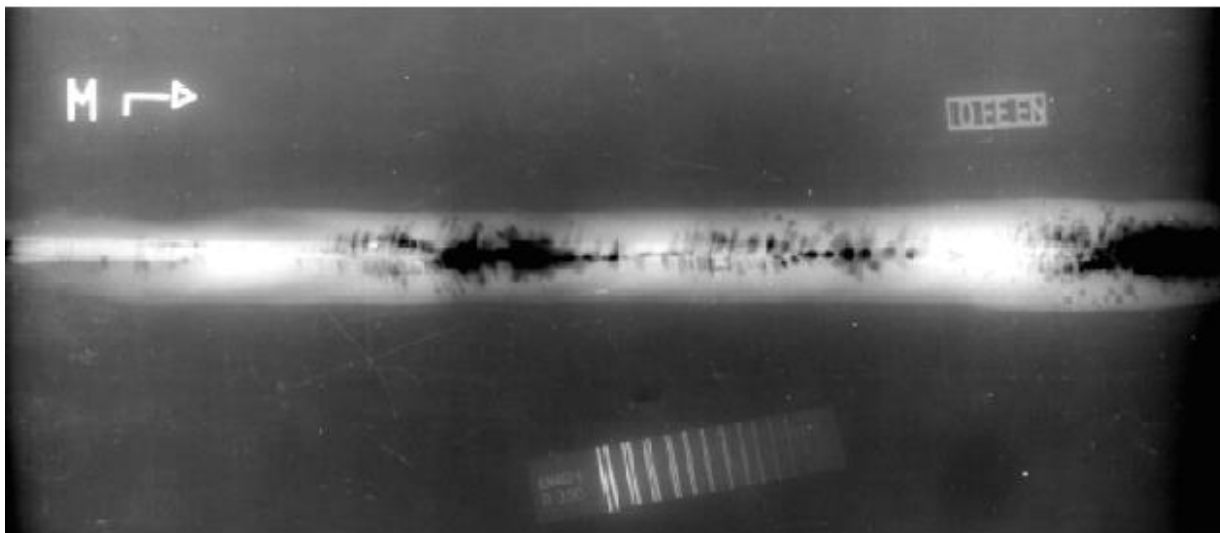
Napon, kV	Struja, mA	Film fokus udaljenost, mm
200	4	700

Nakon snimanja na RTG uređaju, slikovna ploča skenirana je na skeneru „VMI 5100“. Parametri skeniranja prikazani su u tablici 12.

Tablica 12. Parametri skeniranja uzorka „C“

Napon lasera, V	Napon fotomultiplikatora, V	Rezolucija skeniranja, μm
15	5,25	50

Na slici 55. prikazan je dobiveni radiogram zavora.



Slika 55. Radiogram zavora – uzorak „C“

Na radiogramu je vidljiv jako velik broj raznih nepravilnosti unutar zavarenog spoja (naljepljivanje, pore, šupljine) što upućuje na veliku osjetljivost „D-Arc“ sustava i kvalitete zavarenog spoja na pripremu spoja i parametre zavarivanja. Zbog toga je potrebno veliku pažnju usmjeriti prema tom dijelu procesa zavarivanja.

4.5. Ekonomska analiza

Usporedbom rezultata ispitivanja u prethodnim odlomcima zaključeno je da se primjenom modificiranog MAG zavarivanja uz primjenu zakopanog luka dobivaju dovoljno kvalitetni zavareni spojevi koji omogućuju korištenje ovog postupka kao zamjenu za konvencionalno MAG zavarivanje. Ipak, jako bitna stavka u zamjeni konvencionalnog MAG postupka modificiranim MAG postupkom je usporedba ta dva postupka s ekonomskog pogleda. U sljedećih nekoliko odlomaka obrađena je ova tema usporedbom nekoliko najutjecajnijih faktora.

4.5.1. Priprema spoja

Za zavarivanje sučeonog spoja čelika S355 J2+N debljine 20 mm konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja priprema spoja se, prema [30], izvodi kao V priprema s kutem otvora od 55°. Za zavarivanje istog spoja primjenom modificiranog MAG postupka zakopanim lukom, prema [29], spoj se priprema kao ½-V spoj s kutem otvora od 27,5°. Prema [28] moguća je i ½-Y priprema.

Prema tome, vrijeme i troškovi pripreme spoja za modificirano MAG zavarivanje uz primjenu zakopanog luka bitno se smanjuju u odnosu na pripremu spoja za konvencionalno MAG zavarivanje.

4.5.2. Dodatni materijal i zaštitni plin

Volumen potrebnog dodatnog materijala moguće je približno izračunati uz pomoć površine presjeka žlijeba za zavarivanje (F). Teorijsku vrijednost površine presjeka potrebno je pomnožiti s određenim korekcijskim faktorom koji ovisi o obliku pripreme spoja. U ovom slučaju, zbog pojednostavljenja, u obzir je uzeta samo površina presjeka žlijeba za zavarivanje. [31]

Za uzorak „A“ površina presjeka žlijeba računa se prema izrazu:

$$F = \delta^2 * \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) + b * \delta, \text{ mm}^2 \quad (1)$$

gdje su: δ – debljina materijala, α – kut otvora, b – širina razmaka između radnih komada.

Za uzorak „B“ površina presjeka žlijeba računa se prema izrazu:

$$F = \frac{\delta^2 * \operatorname{tg}(\alpha)}{2}, \text{ mm}^2 \quad (2)$$

gdje su: δ – debljina materijala, α – kut otvora.

U tablici 13. dan je izračun površine presjeka žlijeba za oba uzorka.

Tablica 13. Izračun površine presjeka žlijeba

	Uzorak „A“	Uzorak „B“
Debljina materijala (δ , mm)	20	20
Kut otvora (α , °)	55	27,5
Razmak (b , mm)	3	0
Površina presjeka žlijeba (F , mm ²)	268,23	104,11

Usporedbom dobivenih rezultata zaključuje se da je kod zavarivanja konvencionalnim MAG postupkom potrebna preko 2,5 puta veća količina dodatnog materijala u odnosu na modificirani MAG

postupak uz primjenu zakopanog luka. Uzevši u obzir mogućnost i $\frac{1}{2}$ -Y pripreme, čime se smanjuje i površina presjeka žlijeba, taj omjer može biti još i veći.

Brzina dodavanja žice i protok zaštitnog plina mogu biti bitno veći kod „D-Arc“ sustava u odnosu na konvencionalno MAG zavarivanje čime se povećava i njihova potrošnja u vremenu. To dovodi do češće potrebe za mijenjanjem koluta žice i boce sa zaštitnim plinom na što se gubi vrijeme. Postoji mogućnost korištenja većih koluta žice i većih boca plina kod primjene „D-Arc“ sustava za koje je potrebno osigurati prostor ukoliko se odluči za tu opciju.

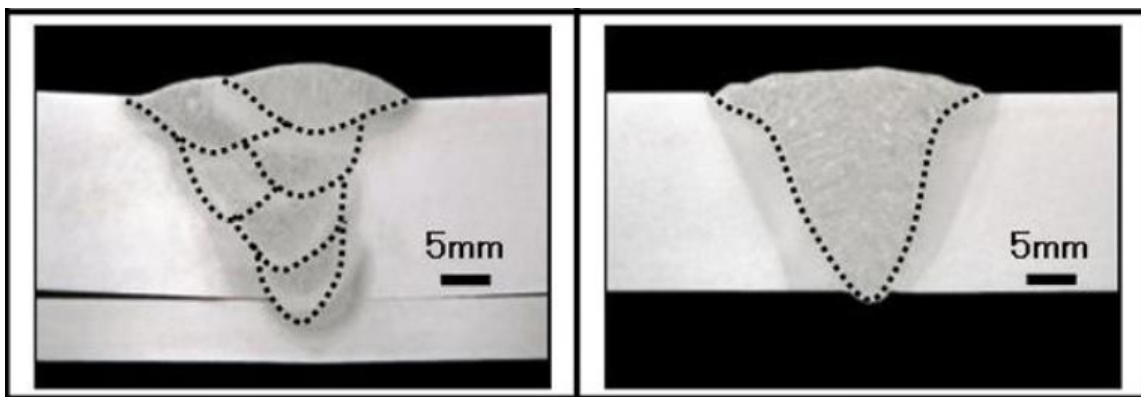
4.5.3. Vrijeme zavarivanja

Na vrijeme potrebno za zavarivanje utječe nekoliko čimbenika od kojih su najvažniji brzina zavarivanja i broj potrebnih prolaza. Velika prednost primjene „D-Arc“ sustava je mogućnost zavarivanja materijala debljine do 20 mm u jednom prolazu. Konvencionalnim MAG zavarivanjem isti materijal zavaruje se u više od 10 prolaza. Nakon svakog od potrebnih prolaza robot mora prijeći put kojim se vraća u početnu točku zavarivanja. Ako se razlikuju parametri zavarivanja za određene prolaze, operater mora namjestiti tražene parametre za sljedeći prolaz. Uz to, nakon svakog prolaza potrebno je pričekati da se radni komad ohladi na potrebnu temperaturu međuprolaza ukoliko je ista navedena u dokumentaciji. Vrijeme čekanja povećava se brojem prolaza zbog sve veće zasićenosti radnog komada toplinom. Jedan od mogućih problema povezanih uz vrijeme zavarivanja kod konvencionalnog MAG zavarivanja robotom je zauzetost robota. Robot nije u mogućnosti zavarivati drugi komad dok god je prošli na radnoj ploči što znači da je robot u praznom hodu dok se radni komad hladi na međuprolaznu temperaturu (osim u slučaju robota koji se koriste na dvije radne jedinice što bitno utječe na povećanje potrebnog mjesta, složenost programa i cijenu robota). Brzine zavarivanja nešto su veće uz primjenu modificiranog MAG zavarivanja zakopanim lukom u odnosu na konvencionalno MAG zavarivanje. To se posebno ističe u odnosu vrijeme zavarivanja korijenskog prolaza i popune kod konvencionalnog MAG zavarivanja gdje su brzine i više od tri puta manje.

Korištenjem modificiranog MAG postupka uz primjenu zakopanog luka bitno se smanjuje vrijeme potrebno za zavarivanje u odnosu na konvencionalni MAG postupak. To bitno utječe na povećanje broja zavaresa koje je moguće zavariti u određenom vremenu korištenjem „D-Arc“ sustava u odnosu na zavarivanje konvencionalnim MAG postupkom.

4.5.4. Deformacije

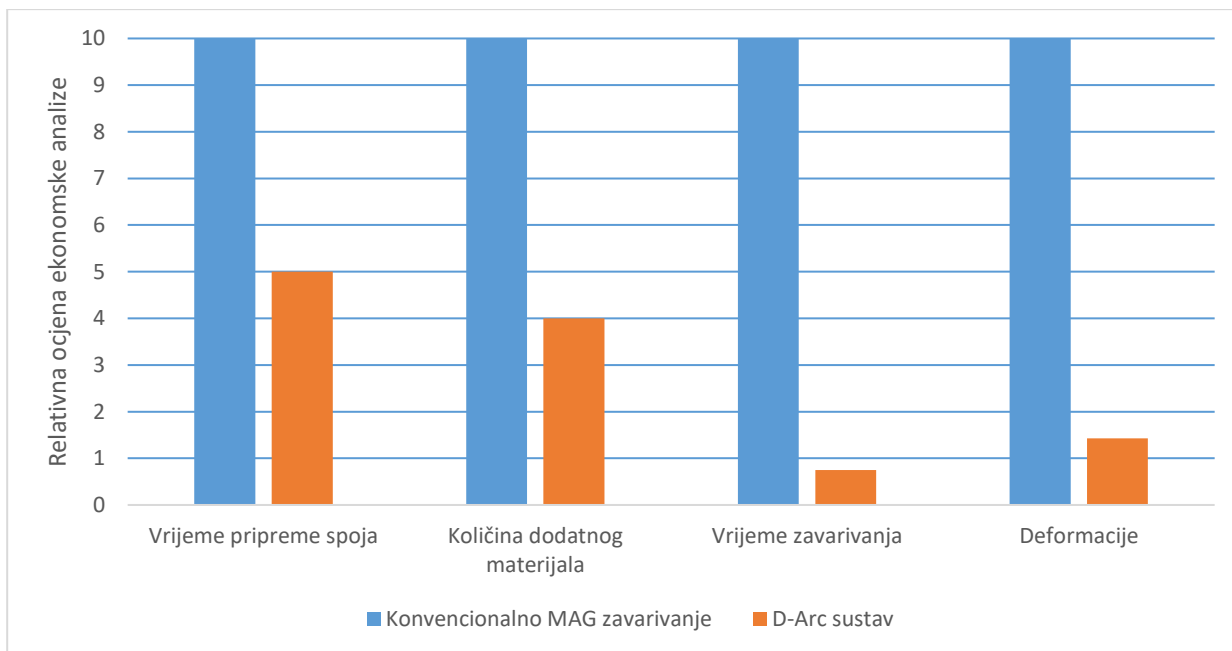
Prilikom zavarivanja debljih materijala konvencionalnim MAG postupkom dolazi do deformacija radnog komada uslijed većeg broja potrebnih prolaza kojima se deponira velika količina dodatnog materijala. Primjenom „D-Arc“ sustava deformacije je moguće smanjiti i do nekoliko puta u odnosu na upotrebu konvencionalnog MAG postupka. To je posljedica smanjenja broja ciklusa grijanja radnog komada s više od 10 ciklusa na samo jedan ciklus. Utjecaj na pojavu deformacija ima i priprema spoja, odnosno potrebna količina dodatnog materijala koja je bitno manja kod „D-Arc“ sustava čime se smanjuju deformacije. Na slici 56. usporedni je prikaz dva zavarena spoja gdje se vidi razlika između deformacija. S lijeve strane slike nalazi se spoj zavaren konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja, dok je na desnoj strani slike spoj zavaren „D-Arc“ sustavom.



Slika 56. Deformacije radnih komada [28]

4.5.5. Grafički prikaz rezultata analize

Na grafikonu prikazanom na slici 57. prikazana je usporedba rezultata temeljenih na vrijednostima izmjerenim u prethodnim odlomcima. Rezultati su zbog preglednosti i jednostavnosti preračunati u vrijednosti na skali do 10 gdje manji rezultat pokazuje poboljšanje u promatranoj kategoriji. Na grafikonu se jasno vide poboljšanja koja se dobivaju korištenjem modificiranog MAG postupka zavarivanja uz primjenu zakopanog luka kao zamjenu za konvencionalni MAG postupak zavarivanja, naročito kod kategorija koje se odnose na vrijeme zavarivanja i deformacije.



Slika 57. Grafikon rezultata ekonomske analize uzoraka zavarenih konvencionalnim MAG postupkom i upotrebom „D-Arc“ sustava

5. ZAKLJUČAK

Rezultat svakodnevnih istraživanja i razvoja MAG postupaka zavarivanja temeljenih na modificiranim prijenosima metala u električnom luku je sve manja konkurentnost konvencionalnih MAG postupaka s obzirom na efikasnost, produktivnost i kvalitetu. Najčešći ciljevi poboljšanja prilikom razvijanja modificiranih postupaka su smanjenje ili eliminacija rasprskivanja kapljica metala, povećanje penetracije i brzine zavarivanja te povećanje stabilnosti prijenosa metala u električnom luku. Visokoučinski postupci zavarivanja razvijeni su s ciljem ostvarivanja zahtijevane kvalitete i pouzdanosti zavarenog spoja te prihvatljive cijene zavarene konstrukcije uz povećanje produktivnosti zavarivanja. Jedan od takvih postupaka je i modificirani MAG postupak zavarivanja koji primjenjuje zakopani luk kod kojeg je električni luk postavljen ispod razine površine rastaljenog metala zavara.

Usporedbom uzorka „A“ zavarenog konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja i uzorka „B“ zavarenog modificiranog MAG postupka zavarivanja uz primjenu zakopanog luka zaključuje se da ovaj modificirani postupak daje velika poboljšanja u odnosu na konvencionalni MAG postupak s obzirom na vrijeme i troškove pripreme spoja, količine dodatnog materijala i zaštitnog plina, vrijeme zavarivanja te deformacija radnih komada. Zbog veće penetracije koja se postiže ovim postupkom zavarivanja zahtjevi za pripremom spoja su manji ($\frac{1}{2}$ -V priprema, $\frac{1}{2}$ -Y priprema ili I priprema za razliku od V pripreme koja je najčešća kod konvencionalnog MAG zavarivanja) čime se vrijeme i troškovi pripreme spoja bitno smanjuju. Zbog razlika u pripremi spoja smanjuje se i potrebna količina dodatnog materijala. Ovaj postupak omogućava zavarivanje materijala debljine do 20 mm u jednom prolazu što višestruko ubrzava proces zavarivanja. Smanjenjem broja prolaza smanjuje se i mogućnost pojave deformacija radnog komada zbog manjeg broja ciklusa grijanja radnog komada u odnosu na konvencionalni MAG postupak (više od 10 ciklusa kod konvencionalnog MAG zavarivanja zamjenjuje se jednim ciklusom grijanja primjenom „D-Arc“ sustava). Posebno je potrebno obratiti pažnju na način pripreme spoja i parametre zavarivanja prilikom zavarivanja ovim postupkom iz razloga što pogrešan odabir i izvedba pripreme spoja daju zavare izrazito loše kvalitete.

6. LITERATURA

- [1] Gas Metal Arc Welding, s interneta,
http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf ...dostupno 21.03.2018.
- [2] Garašić, I.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Postupci zavarivanja“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, s interneta
https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/?action=view&site_id=90&id=1548 ...dostupno 21.03.2018.
- [3] Kralj, S., Andrić, Š.: *Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [4] Bee, J.V., Garrett, G.G., Taplin, D.M.R.: *Materials Engineering: Proceedings of the First International Symposium*, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, 1985.
- [5] Rudan, M.: *Zavarivanje u zaštiti plina taljivom elektrodom (MIG/MAG) - Glavna obilježja i područja primjene*, Društvo za tehniku zavarivanja Istra, Pula, 2005., s interneta
<http://www.dtzi.hr/upload/pdf/2.%20SEMINAR/Brosura%20seminar%202.pdf> ...dostupno 21.03.2018.
- [6] <http://www.wballoys.co.uk/MIG/images/welding-short-circuiting-transfer.jpg> ...dostupno 21.03.2018.
- [7] Rudan, M.: *Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom*, Pula, 2007., s interneta
<http://www.dtzi.hr/upload/pdf/4.%20SEMINAR/2.%20RAD.pdf> ...dostupno 21.03.2018.
- [8] Garašić, I., Kožuh, Z.: *Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [9] Rudan, M.: *MIG zavarivanje tankih aluminijskih limova*, 5. seminar, Pula, 2008.
- [10] Bilandžija, J.: *Značajke modernih izvora struje za MAG zavarivanje*, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [11] DeRuntz, D.B.: *Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer Welding to Industry*, Journal of Industrial Technology vol.19, br.4, kolovoz-listopad, 2003.
- [12] Horvat, M., Kondić, V.: *Primjeri modificiranih postupaka MIG/MAG zavarivanja*, Tehnički glasnik 6, 2(2012.), pp. 137-140

-
- [13] Rosado, T., Almeida, P., Pires, I., Miranda, R., Quintino, L.: *Innovation in Arc Welding*, s interneta
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.487.6352&rep=rep1&type=pdf>
...dostupno 11.04.2018.
- [14] Brumec, G.: *Zavarivanje cjevovoda MAG postupcima*, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [15] *Surface Tension Transfer (STT)*, s interneta,
<http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX220.pdf>
...dostupno 12.04.2018.
- [16] Himmelbauer, K.: *Postupak CMT-novo u zavarivačkoj tehnologiji*, Zavarivanje vol.51, pp. 115-121, svibanj-kolovoz, 2008.
- [17] Tucman, T.: *CMT proces – nova revolucija u digitalnom zavarivanju*, Pula, 2008., s interneta
<http://www.dtzi.hr/upload/pdf/5.%20SEMINAR/3.%20RAD.pdf> ...dostupno 13.04.2018.
- [18] Babić, N.: *Analiza dinamičke karakteristike MAG CBT zavarivanja*, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [19] Garašić, I., Kožuh, Z., Remenar, M.: *Analiza prijenosa metala pri MAG CBT zavarivanju*, Zavarivanje vol.57, pp. 85-93, svibanj-kolovoz, 2014.
- [20] Budig, B.: *EWM-forceArc: Novi koncept prijenosa za MIG/MAG zavarivanje*, Zavarivanje vol.55, pp. 21-27, siječanj-travanj, 2012.
- [21] *Power Mode*, s interneta,
<http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX260.pdf> ...dostupno 16.04.2018.
- [22] Bajs, M.: *Primjena i specifičnosti modificiranih MAG postupaka*, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [23] *Flux Cored Arc Welding*, s interneta,
<http://www.weldguru.com/support-files/flux-cored-arc-welding.pdf> ...dostupno 18.04.2018.
- [24] Mikulić, I.: *Visokoučinski postupci MAG zavarivanja*, Završni rad, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2016.
- [25] Klobučar, M.: *Teorijske i praktične osnove MIG/MAG postupka zavarivanja*, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2016.
- [26] *Faster with two wire electrodes*, s interneta,
-

- http://www3.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-5D874412-4BD4BBAD/fronius_usa/17_mig_schweissen_mit_zwei_drahtelektroden_gb.pdf ...dostupno 22.04.2018.
- [27] Dzelnitzki, D.: *Prednosti visokoučinskog MAG zavarivanja*, Zavarivanje vol.55, pp. 15-21, siječanj-travanj, 2012.
- [28] *Razvoj visokoučinskog zavarivanja čelika za debele limove primjenom zakopanog električnog luka velike struje*, s interneta,
<https://servus.hr/strucni-clanci/razvoj-visokoucinskog-zavarivanja-celika-debele-limove-primjenom-zakopanog-elektrcnog-luka-velike-struje/> ...dostupno 22.04.2018.
- [29] Vuherer, T., Garašić, I., Kastelic, P.: *Properties of butt-weld jiont welded by new D-Arc process*
- [30] Garašić, I.: *Specifikacija robotiziranog MAG zavarivanja čelika S355 J2+N debljine 20 mm*
- [31] *Troškovi kod zavarivanja*, s interneta,
http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/na_dipl4/9.pdf ...dostupno 02.05.2018.

7. PRILOG

1. CD-R disc – pdf verzija diplomskog rada.